



United States Agency for
International Development



Environmental Export Council

*Matrices de las
Tecnologías de
Tratamiento de
las Aguas Negras
Municipales*

18 Junio 1998

Distinguidos colegas:

La Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Environmental Export Council (EEC) tienen el gusto de presentar el documento adjunto, *Matrices de las Tecnologías de Tratamiento de las Aguas Negras Municipales*, elaborado por Concurrent Technologies Corporation. Consideramos que este manual constituirá una valiosa herramienta para la toma de decisiones a nivel municipal en lo que respecta al proceso de diseño, ejecución y financiamiento de los sistemas de tratamiento de aguas negras. Las matrices ofrecen información sobre el funcionamiento, rendimiento, requisitos técnicos y costo de una serie de opciones de tratamiento de aguas servidas; indudablemente será de utilidad en la selección de la tecnología más apropiada para los respectivos sistemas municipales.

El presente documento fue elaborado en base a las necesidades identificadas por el Equipo de Trabajo sobre Recursos Hídricos para América Latina (LAWTF), grupo de expertos que empezó a reunirse en 1995 para estudiar los temas relativos a la privatización de los sistemas de tratamiento de aguas negras y recursos hídricos en la región, particularmente en el Brasil. Las labores técnicas, reguladoras y financieras del LAWTF forman parte de la Iniciativa Latinoamericana para la Tecnología Ambiental (LAIET), iniciativa de colaboración entre el EEC y la USAID destinada a divulgar tecnologías y procesos ambientales limpios y a promover inversiones en los mismos. Se ha establecido una serie de alianzas en virtud de la LAIET a fin de fortalecer la coordinación entre los programas públicos, privados y no gubernamentales con miras a la consecución de dichas metas.

Para mayor información sobre el LAWTF o si desean copias adicionales, sírvanse comunicarse con Anne Martin, Coordinadora de País (Brasil), en el EEC, al teléfono (202) 466 6933.

Jefferson Seabright
Director
USAID/Global/EET
Council

John Mizroch
Director Ejecutivo
Environmental Export

La presente publicación pudo realizarse gracias al apoyo brindado por la Oficina de Energía, Medio Ambiente y Tecnología, División Mundial, Agencia de los EE.UU. para el Desarrollo Internacional (USAID), en virtud de las condiciones de la donación N° LAG 5743-A-00 3041-00. Las opiniones expresadas en la presente son las de los autores y no reflejan necesariamente el punto de vista de la Agencia de los EE.UU. para el Desarrollo Internacional.

ÍNDICE DE MATERIAS

1.0	EQUIPO DE TRABAJO SOBRE RECURSOS HÍDRICOS EN LATINOAMÉRICA - LAWTF.....	1
2.0	ELABORACIÓN DE MATRICES.....	2
3.0	TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS NEGRAS MUNICIPALES.....	3
3.1	Tecnologías de tratamiento físico	3
3.1.1	Adsorción	4
3.1.2	Aeración.....	4
3.1.3	Clarificación y sedimentación	4
3.1.4	Pulverización/trituración	6
3.1.5	Flotación.....	6
3.1.6	Floculación	7
3.1.7	Microfiltración.....	7
3.1.8	Filtración a través de medios múltiples	8
3.1.9	Cribado	9
3.2	Coagulación	14
3.3	Tratamiento biológico	14
3.3.1	Digestión anaeróbica	15
3.3.2	Tratamiento biológico aeróbico y métodos híbridos	16
3.4	Tratamiento avanzado	22
3.5	Desinfección.....	33
3.6	Tratamiento de lodo	36
3.6.1	Espesamiento del lodo.....	38
3.6.2	Deshidratación del lodos	38
3.6.3	Eliminación del residuo del lodo.....	40
3.7	Tratamiento de aguas negras en tierra.....	45
3.8	Análisis de costo	47
4.0	RESUMEN	47

APÉNDICES

APÉNDICE A REFERENCIAS.....	48
APÉNDICE B ASOCIACIONES Y ORGANIZACIONES	51
APÉNDICE C GUÍAS PARA LOS COMPRADORES E ÍNDICES DE ABASTACEDORES	55
APÉNDICE D DIRECCIONES EN INTERNET.....	57
APÉNDICE E ÍNDICE DE CARACTERÍSTICAS Y EXPLICACIONES	58

1.0 EQUIPO DE TRABAJO SOBRE RECURSOS HÍDRICOS EN LATINOAMÉRICA - LAWTF

A fin de optimizar las ventajas derivadas de la creciente mundialización, el desarrollo económico y la conciencia sobre el medio ambiente, el Environmental Export Council (EEC), en colaboración con la Agencia de los EE.UU. para el Desarrollo Internacional (USAID) ha elaborado un programa denominado Iniciativa Latinoamericana sobre Tecnologías Ambientales (LAIET). La LAIET sirve de programa global para una serie de actividades que se llevan a cabo en distintas regiones de América Latina. El objetivo principal de los programas de la LAIET es aumentar la participación del sector privado en el desarrollo ambiental sustentable; ello se logra conscientizando al sector privado sobre las tecnologías ambientales más apropiadas y fomentando la inversión del sector privado en tecnologías y procesos limpios. En virtud de la LAIET, dichas metas se alcanzan a través de la constitución de alianzas que catalizan los recursos del sector público, sector privado, asociaciones industriales y organizaciones no gubernamentales. El resultado es un esfuerzo mancomunado entre los sectores público y privado en pos del objetivo mutuo de fomentar un crecimiento y desarrollo económico sostenibles desde el punto de vista ambiental.

En los últimos cuatro años, el EEC ha lanzado una serie de programas dirigidos específicamente a aumentar el nivel de inversiones privadas de los EE.UU. en la privatización y concesiones de sistemas de tratamiento de aguas negras en el Brasil. Con ese fin, el EEC estableció el Equipo de Trabajo sobre Recursos Hídricos en América Latina (LAWTF). El LAWTF es un grupo pequeño de expertos de Brasil y los EE.UU., de los sectores de financiamiento de proyectos, tecnologías de tratamiento de aguas negras y del ámbito del derecho federal y contractual, que colaboran con el EEC, la USAID y el Departamento de Comercio para superar los obstáculos que se interponen al financiamiento, ejecución, y mantenimiento de las concesiones municipales de tratamiento de aguas negras y a la privatización de las mismas en Latinoamérica.

El propósito del LAWTF es crear las condiciones necesarias para fomentar la cartera de inversiones privadas a largo plazo en proyectos de tratamiento de aguas negras en Latinoamérica. Con ese fin, el EEC ha contratado a profesionales del sector público y privado que han trabajado gratuitamente durante muchos años en la formulación de recomendaciones normativas, técnicas y financieras para la ejecución de programas de privatización de los sistemas de tratamiento de agua y alcantarillado. Entre los participantes se encuentran los alcaldes de los estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Mato Grosso do Sul y Minas Gerais, además de representantes del Banco de Desarrollo Económico y Social del Brasil (BNDES), el Eximbank de los EE.UU., el Banco Interamericano de Desarrollo, la Corporación Internacional de Financiamiento, Concurrent Technologies Corporation (CTC), Infraestructura CG/LA, etc.

Como resultado de las reuniones del LAWTF se han elaborado también una serie de documentos cuyo enfoque son los aspectos jurídicos, técnicos y financieros de las concesiones, cuyo objetivo es captar capitales para respaldar la viabilidad a largo plazo de los proyectos. El EEC contrató a la CTC para la elaboración del documento más reciente, una matriz que describe y compara las tecnologías existentes de tratamiento de aguas

negras municipales en base a su rendimiento, requisitos y costo. El objetivo del documento es respaldar las labores del LATWTF y ayudar a los funcionarios municipales y a otras autoridades pertinentes a evaluar las distintas opciones de tratamiento de aguas negras según sus necesidades.

2.0 ELABORACIÓN DE MATRICES

El presente documento se fundamenta en la literatura existente y en la experiencia de la CTC. También se han incorporado comentarios de fuentes externas.

Si se realiza un análisis de los diseños de plantas municipales para el tratamiento de aguas negras puede observarse que el tratamiento consiste de una serie de operaciones aisladas empleadas ampliamente y hasta universalmente en plantas que atienden a comunidades urbanas medianas y grandes (con una población de decenas de miles de habitantes o más) al mismo tiempo que cumplen con las normas más modernas de los EE.UU. en materia de efluentes. Asimismo, hay una serie de operaciones que se utilizan con frecuencia y otras que complementan los pasos básicos. La figura 1 es un flujograma general de una planta de tratamiento de aguas municipales que incluye dichas operaciones. El flujograma es una simplificación que no muestra todos los pasos o flujos de materiales (por ejemplo, las sustancias químicas que se agregan, la aeración, el reingreso del lodo o la recuperación de metano).

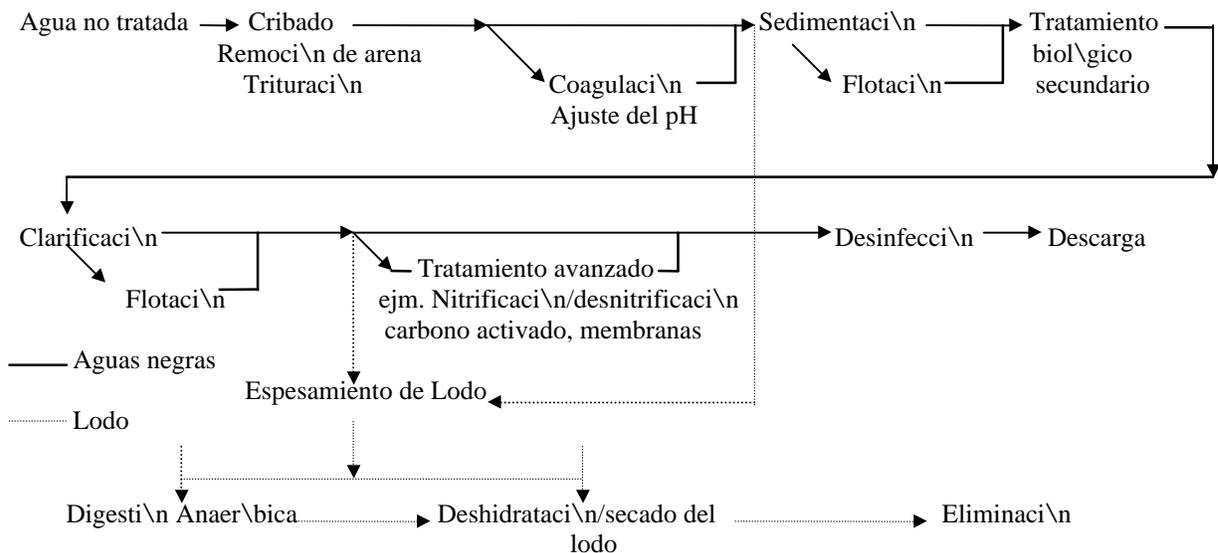


Figura 1: Flujograma genérico del tratamiento de aguas negras municipales

En vez de elaborar una matriz única, se elaboró una gama de matrices para comparar las tecnologías de tratamiento de aguas negras ya que algunas operaciones no son comparables sino que han sido concebidas para cumplir funciones distintas. Por ejemplo, las tecnologías de desinfección no son comparables a las de sedimentación. Las matrices presentan tecnologías comparables, y en algunos casos se agrupan por tipo. Un caso es el de las tecnologías de tratamiento biológico anaeróbico que, aunque puede que sean diferentes, se prestan a una comparación; por ejemplo, con un enfoque en particular pueden compararse distintas variaciones del proceso de lodo activado. Se recopiló información sobre las

ventajas y desventajas relativas de las diferentes opciones tecnológicas. Los paradigmas pertinentes que se incluyen en cada matriz varían según la operación que se describa. En ciertos casos se dispone de la información necesaria: en algunos, de datos cuantitativos, mientras que en otros casos sólo se dispone de datos semicuantitativos o cualitativos. A menudo, los costos y el desempeño dependen de los factores específicos del diseño de la planta y no se pueden generalizar.

La definición de los parámetros del presente estudio se basa en una serie de premisas. Se presupone que las aguas negras tóxicas o refractarias que contienen metales, solventes orgánicos y otros materiales perjudiciales para los sistemas convencionales de tratamiento de aguas servidas municipales sean tratadas a un nivel suficiente, en una etapa previa, por las industrias que las generaron. Por lo tanto, no se han incluido las tecnologías de tratamiento de dichos efluentes. Se presupone también que ya existe una infraestructura de conducción de aguas negras y que los desagües pluviales no ingresan al sistema de alcantarillado. En otras palabras, las tecnologías de recolección de alcantarillado no se contemplan en el presente trabajo. Asimismo, se presupone que las municipalidades con un nivel de población de decenas de miles de habitantes o más serán los principales usuarios del documento. No se consideran tampoco las plantas pequeñas combinadas ni los tanques sépticos. Por último, el estudio se concentra en los procesos disponibles y no en las tecnologías en fase de desarrollo e investigación.

3.0 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS NEGRAS MUNICIPALES

En las siguientes secciones se presenta la descripción y matrices de las tecnologías de tratamiento de las aguas negras municipales.

3.1 Tecnologías de tratamiento físico

Las tecnologías de tratamiento físico de las aguas servidas municipales se utilizan en distintas etapas de dicho proceso. Normalmente, los tamices, las cámaras de arena y la pulverización (trituration) constituyen los primeros pasos del tratamiento de las aguas negras. Se utiliza la sedimentación, complementada a veces por la flotación, para remover las partículas en suspensión durante el tratamiento primario. La aeración es un elemento integral de los tratamientos biológicos aeróbicos. También pueden utilizarse la sedimentación, la filtración, la flotación y otros métodos físicos para clarificar los efluentes resultantes del tratamiento biológico de las aguas negras. Se utiliza una serie de tecnologías físicas de tratamiento para espesar y deshidratar el lodo (véase la sección 3.6.1). Por último, la filtración y la adsorción pueden emplearse como tratamiento avanzado para obtener agua de alta calidad en la descarga final.

Los siguientes párrafos describen cada una de las tecnologías de tratamiento físico de las aguas negras y lodo. Las descripciones también indican aquellos factores importantes que deben considerarse en la selección y diseño de las plantas de tratamiento de aguas negras. También, en la medida de lo posible, se presentan algunas consideraciones relativas a los costos.

Los Cuadros 2 a 5 presentan parámetros de rendimiento y diseño más específicos de los distintos tipos de tecnología. También se incluyen datos sobre sus características, tales como el caudal de las aguas servidas, el tratamiento, y los equipos y costos.

El Cuadro 2 presenta información detallada sobre el diseño, tanto de la tecnología de cribado como de la de pulverización y trituración. Los Cuadros 3, 4 y 5 presentan datos sobre la remoción de arena, la clarificación y sedimentación y las tecnologías de flotación. Para algunos parámetros, también se ofrece información subjetiva, en la que (+++) es la clasificación más favorable, (++) la intermedia y (+) la menos favorable para una determinada característica. Se incluye la justificación de estas clasificaciones subjetivas.

3.1.1. Adsorción

La adsorción es una técnica utilizada comúnmente para remover químicos orgánicos por medio de la adhesión física de dichos químicos a la superficie de un sólido. Un adsorbente común es el carbono granulado activado (CGA), que es sumamente poroso. En un sistema típico CGA, el agua contaminada ingresa en la parte superior de un recipiente parcialmente lleno de adsorbente. Se realiza una percolación del agua a través del CGA y se libera en el fondo. A la larga, filtro se atasca con contaminantes adsorbidos y debe reemplazarse o regenerarse. La regeneración es un proceso costoso que utiliza mucha energía y que generalmente se realiza fuera de la planta. Los filtros de carbono que debido a su composición de contaminantes no puedan regenerarse deben prepararse debidamente para su eliminación (Masters, 1991, 253-254).

3.1.2. Aeración

La aeración puede ser parte integral de otros sistemas de tratamiento tales como el tratamiento biológico del lodo activado. En el sistema de lodo activado, un tanque de aeración recibe una combinación de efluentes con una masa de microorganismos biológicos reciclados (lodo activado). Se bombea el aire u oxígeno hacia el tanque, y la mezcla se agita continuamente. Al cabo de 6 u 8 horas de agitación, las aguas negras fluyen hacia un tanque secundario para que los sólidos se sedimenten. Debe ejercerse un control cuidadoso de la demanda de oxígeno a través del diseño, explotación y mantenimiento del sistema, para que éste funcione de manera adecuada. A través del uso de la aeración, el sistema de lodo activado ocupa mucho menos terreno que el sistema de filtros percoladores, y los resultados son los mismos. El sistema aireado de lodo activado también conlleva ciertos beneficios en lo que respecta a los costos, desempeño y estética en comparación con los filtros percoladores (véase la sección 3.1.2, en la que se consideran las distintas opciones de tratamiento biológico). Sin embargo, requiere más energía para las bombas y soplantes, y su costo de explotación es más alto (Masters, 1991, 245-247).

3.1.3. Clarificación y sedimentación

La clarificación es la remoción física de los sólidos en suspensión que se encuentran en el agua. En general, se utiliza la sedimentación para el tratamiento primario de las aguas servidas así como para la remoción de sólidos en suspensión después del tratamiento

secundario (biológico). Puede clarificarse el agua a través de filtros múltiples (véase la sección 3.1.8) o, para obtener agua de alta calidad, puede recurrirse a la microfiltración (véase la sección 3.1.7). También pueden utilizarse la floculación (véase la sección 3.1.6) y la flotación (véase la sección 3.1.5) para coadyuvar en la clarificación del agua.

Normalmente, el clarificador (denominado también tanque o cuenca de sedimentación) es un tanque grande, circular, cuadrado o rectangular en el que el régimen del caudal se reduce lo suficiente para que la mayoría de los sólidos en suspensión se sedimenten por gravedad. Los tiempos de detención promedio oscilan entre 1 y 10 horas. Los plazos de detención más largos mejoran el rendimiento pero requieren un tanque más grande y más costoso. En el tratamiento primario, un tiempo de detención de 2 a 3 horas puede remover de 50% a 65% de los sólidos en suspensión y de 25% a 40% de la demanda de oxígeno biológico (BOD) al mismo tiempo que se generan entre 2.500 y 3.500 litros de lodo por un millón de litros aguas negras tratadas. Los clarificadores también pueden utilizarse para sedimentar materiales después del tratamiento (biológico) secundario. Los raspadores tipo arado mueven los sólidos sedimentados a un sumidero o tolva para luego ser succionados del fondo del tanque. Los despumadores remueven la grasa y la nata espumosa que flotan en la parte superior del tanque. En aquellos casos en los que sólo se lleva a cabo el tratamiento primario (o sea, no se realiza un tratamiento secundario o biológico), se clora el efluente del clarificador para destruir las bacterias y controlar los malos olores (Masters 1991, 243).

Consideraciones principales que deben tomarse en cuenta en el diseño del clarificador: el volumen y naturaleza de los sólidos en suspensión en el efluente primario pueden incidir considerablemente en el rendimiento de los sólidos resultantes de los procesos dobles. Los medios de filtración rocosos tienden a reducir los efectos de una alta concentración de sólidos en suspensión en el efluente primario (Water Environment Federation y American Society of Civil Engineers, 1991).

Geometría del tanque—clarificadores primarios y secundarios: En general, en las plantas en las que no hay limitaciones en cuanto al tamaño del terreno se utilizan tanques circulares; su rendimiento es bueno aún con equipo mecánico relativamente sencillo. Los tanques cuadrados con mecanismos centrales requieren barredores de esquina sobre los brazos del rastrillo y, en comparación con los tanques circulares, disposiciones más complejas para la remoción de la nata espumosa. Por lo tanto, los tanques cuadrados (y rectangulares) requieren más mantenimiento para un rendimiento aceptable. La utilización de muros medianeros en los tanques cuadrados y rectangulares reduce la necesidad de espacio y ofrece también la oportunidad de reducir los costos de construcción. Una posible solución transada son las formas hexagonales (Water Environment Federation y American Society of Civil Engineers, 1991).

Geometría y profundidad del tanque de los clarificadores secundarios: Entre las formas más comunes se encuentran los tanques rectangulares, cuadrados y circulares. En el caso de cargas hidráulicas promedio o máximas, no hay diferencia observable en el rendimiento de los clarificadores secundarios con formas diferentes. Sin embargo, una profundidad mayor generalmente mejora el rendimiento en la remoción total de los

sólidos en suspensión y en el reciclaje de la concentración de lodo activado. Los costos de construcción aumentan a medida que se incrementa la profundidad. La mayoría de las empresas consultoras de los Estados Unidos utilizan profundidades de 4 a 5 m. Se ha sugerido la utilización de una corrección en la tasa de rebase de 0,17 m/h por cada 0,3 m de reducción de profundidad por debajo del valor mínimo que indican las tablas (Water Environment Federation y American Society of Civil Engineers, 1991).

3.1.4 Pulverización/trituración

El pulverizador es un dispositivo que se utiliza para triturar materias grandes que con frecuencia se encuentran en los tamices. Un pulverizador puede triturar materiales gruesos y convertirlos en pedazos lo suficientemente pequeños para que puedan permanecer en el caudal de aguas negras (Masters 1991, 243).

La trituración es un método de tratar la nata espumosa recolectada, porque con frecuencia contiene otras materias flotantes tales como plásticos (por ejemplo, los aplicadores de tampones). En general, la nata espumosa y la materia flotante miscelánea se envían al digester para ser coprocesadas con el lodo. La trituración de la nata espumosa y del lodo reduce el tamaño de las partículas hasta el punto en que la materia flotante ya no puede reconocerse. Asimismo, la trituración facilita la mezcla durante el proceso de digestión para así realzar la destrucción de grasas y la producción de gas. Puede que se requiera triturar el lodo en dos etapas debido a que ciertas materias flotantes, tales como los aplicadores de tampones, sean difíciles de triturar en sólo una etapa debido a su forma (Outwater 1994, 43, 46-49).

3.1.5 Flotación

Los tres procesos de flotación más comunes son los que se describen a continuación:

1. Flotación con aire disuelto (FAD): Esto ocurre cuando se inyecta aire mientras que las aguas negras están bajo presión. Se liberan burbujas finas cuando se reduce la presión en el tanque de flotación.
2. Flotación con aire: Esto ocurre a través de la aireación, generalmente por medio de un difusor a presión atmosférica.
3. Flotación al vacío: Esto ocurre cuando se saturan las aguas servidas con aire antes de aplicar un proceso al vacío (Corbitt 1989, 6.96).

El método que se utiliza más comúnmente es la FAD. En la FAD, burbujas finas de gas se adhieren a los sólidos en suspensión haciendo que éstos floten a la superficie para su recolección y remoción. La FAD ocurre cuando se inyecta aire al mismo tiempo que las aguas negras están bajo presión. Se liberan las burbujas finas cuando se reduce la presión en el tanque de flotación. La FAD es eficaz para la remoción de una amplia gama de sólidos, pero los métodos de flotación redundan en costos operativos de energía eléctrica más altos (Corbitt 1989, 6.96). Sin embargo, a veces la FAD reduce los costos debido a que resulta en tamaños compactos en comparación con la sedimentación convencional por gravedad. La FAD puede generar lodos más espesos y activos que los que genera la sedimentación por gravedad. La consistencia mayor del lodo produce un volumen de lodo menor, lo que a su vez reduce los costos de manipulación y eliminación del lodo. La utilización de la FAD en la clarificación secundaria produce un reingreso de lodo más espeso y activo, o sea, puede utilizarse una unidad de tratamiento biológico más pequeña y así derivarse ahorros más grandes a nivel de todo el sistema. Puede que algunas unidades FAD requieran operadores más capacitados que los sistemas de sedimentación por gravedad; sin embargo, las unidades FAD automatizadas probablemente requieran muy poca atención por parte de los operadores.

3.1.6 Floculación

En general, la floculación se realiza después de la coagulación. En el tanque de floculación ocurre una agitación ligera durante aproximadamente media hora. Al mismo tiempo, el coagulante de precipitación (por ejemplo, el alumbre o, en caso de que se utilicen el FeCl_3 , el FeSO_4 , etc., otros precipitados) atrae partículas coloidales, formando un flóculo claramente visible. El proceso de mezcla en el tanque de floculación debe realizarse con sumo cuidado. Debe ser suficiente para alentar a las partículas a que se pongan en contacto entre sí, logrando así que aumente el tamaño del flóculo, pero no puede ser tan vigoroso que conduzca al desmoronamiento de las partículas frágiles del flóculo. Asimismo, el proceso de mezcla contribuye a impedir que el flóculo se sedimente en el tanque, cuando más bien ello debe ocurrir en el tanque de sedimentación subsiguiente (Masters 1991, 230-231).

3.1.7 Microfiltración

La microfiltración utiliza membranas cuyo tamaño de poro es de un micrómetro o menos a fin de separar del agua las partículas finas. La microfiltración clarifica el agua y otros fluidos mediante la captación de materia suspendida y de microorganismos en la superficie o dentro de un filtro al mismo tiempo que deja pasar las sustancias disueltas y el agua (Pontius 1990, 711).

3.1.8 Filtración a través de medios múltiples

La filtración se utiliza para: 1) remover sólidos en suspensión como tratamiento previo de las aguas negras cuyo contenido de sólidos en suspensión es bajo; 2) después de la coagulación en el caso de tratamientos físicos y químicos; ó 3) como tratamiento terciario después de un proceso de tratamiento biológico de las aguas negras. La eficiencia de la filtración es función de: 1) la concentración y características de los sólidos en suspensión; 2) las características de los medios de filtración; y 3) el método de funcionamiento del filtro. El tamaño del medio es un factor importante en el diseño del filtro. En filtros de medios dobles, el tamaño se selecciona con miras a producir una remoción de 75% a 90% de los sólidos en suspensión a través de una profundidad del medio de filtración de 0,46 a 0,6 metros. En el Cuadro 1 aparecen los distintos medios de filtración.

Cuadro 1. Tipos de medios de filtración, materiales, tamaños y profundidades

Tipo	Material	Tamaño (mm)	Profundidad (cm)
Un medio			
a. Fino	a. Arena	0,35 a 0,60	25 a 50
b. Grueso	b. Carbón de antracita	1,3 a 1,7	91 a 152
Doble	Arena	0,45 a 0,6	25 a 30
	Carbón de antracita	1,0 a 1,1	51 a 76
Medios múltiples	Granate*	0,25 a 0,4	5 a 10
	Arena	0,45 a 0,55	20 a 30
	Carbón de antracita	1,0 a 1,1	46 a 61

*Pueden utilizarse otros materiales

Los medios de filtración gruesos generalmente permiten pasadas de filtración más largas y responden bien a trastornos en la planta. Tradicionalmente, los medios de filtración dobles y múltiples se han utilizado en aplicaciones de agua potable, y se ha transferido su uso al tratamiento terciario de las aguas servidas. Se logra una tasa de filtración óptima cuando ésta conduce al máximo volumen de filtrado por unidad de superficie de filtración al mismo tiempo que se obtiene una calidad de efluente aceptable. Una tasa de filtración mayor permite que los sólidos penetren los medios gruesos y se acumulen en los medios finos, produciendo la obturación prematura de éstos últimos. Una tasa de filtración baja es insuficiente para lograr una buena penetración de los sólidos en los medios gruesos. La tasa de filtración también tiene influencia sobre la calidad del efluente, según la naturaleza de las partículas que estén siendo removidas.

Puede mejorarse la remoción de los sólidos en suspensión agregando coagulantes a las aguas negras antes de la filtración. La utilización de alumbre también resulta en precipitación y en la remoción de fósforo a través del filtro. No se requiere floculación ya que el filtro hace las veces de floculador. En ambos procesos, debe realizarse un proceso de mezcla eficaz antes de la filtración a fin de dispersar las sustancias químicas. Ya que los sólidos en suspensión se remueven mediante la filtración y no la sedimentación, en general se requiere un volumen de 25% a 50% menor de agentes químicos. Para la mayoría de las aplicaciones, se utiliza una concentración de alimentación máxima de 100 mg/l (Eckenfelder 1989, 381-385).

3.1.9 Cribado

El cribado remueve objetos flotantes grandes tales como trapos, palos u otros objetos que pudieran dañar las bombas o tapar las tuberías pequeñas. El diseño de los tamices varía, pero generalmente consisten de barras de acero paralelas con una separación de entre 2 y 7 cm, seguido luego por un tamiz de malla de alambre con aperturas pequeñas (Masters 1991, 243).

El cribado del lodo y de la nata espumosa remueve eficazmente casi todos los plásticos de la corriente de aguas negras. El cribado separa las partículas en función del tamaño de la apertura del tamiz. Las aperturas pequeñas recolectan más material pero tienen que limpiarse más. Puede que se requieran lavados de alta temperatura para limpiar de manera eficiente los tamices. Sin embargo, una temperatura elevada pudiera conducir a la liberación de compuestos orgánicos e inorgánicos volátiles que tienen un olor desagradable (Outwater 1994, 49).

Cuadro 2. Características de la tecnología de cribaje y de pulverización/trituración

Categoría de la característica	Categoría tecnológica	Cribado					Pulverización/ trituración
	Característica	Rejilla de basura	Mecánico	Continuo	Grueso/barra	Microtamiz/ tamiz fino	
Caudal	Velocidad de aproximación ()	>0,38 ³³	0,60-1,2 ¹⁸	0,60-1,2 ¹⁸	0,60-1,2 ¹		
	Tasa de rebase (m ³ /día/)	NA	NA	NA	NA	295-585 ¹	
Composición del influente	Ancho del tamiz (mm)	38-150 ¹⁸	6-38 ¹⁸	6-38 ¹⁸	12-40 ¹⁴	1-6 ²⁷	NA
	Longitud del corte (mm)	NA	NA	NA	NA	NA	6-19 ²⁸
Tratamiento	Tasa de remoción del BOD (% promedio)	NA	NA ⁵			15-30 ²⁷	
	Tasa de remoción de los SST (% promedio)		5-20 ⁵			15-30 ²⁷	
	Productos derivados	Cribado	cribado	cribado	cribado	cribado	desechos sólidos
Costos estimados (el tamaño de la planta se supone en 37,854 m ³ /día o 10 mgd)	Capital (en miles de US\$, o bajo, mediano, alto)				100 ⁹	500-900 ^{15,16,26}	60-90 ^{15,16,17}
	O&M (en miles de US\$ por año, o bajo, mediano, alto)		40 ⁹				
	Energía eléctrica ³⁵ (en miles de US\$/año, o baja, mediana, alta)				0,9 ⁹		

Notas: NA = No aplicable
SST = Sólidos Totales en Suspensión
BOD = Demanda Biológica de Oxígeno
SS = Sólido en Suspensión
O&M = Operación y Mantenimiento

Hipótesis sobre los costos de la energía eléctrica (a partir de la referencia 9 para todos los cuadros):

electricidad = US\$0,02/kWh
fueloil = US\$0,37/gal
gasolina – US\$0,60/gal

REFERENCIAS

- Corbitt, pg. 6.75
- Corbitt, pg. 6.78
- Corbitt, pg. 6.79
- Pontius, pg. 446-448
- Hicks, pg. 11.27
- Tchohanoglous, pg. 473
- Corbitt, pg. 6.89
- Corbitt, pg. 6.97
- Qasim, pg. 662
- Qasim, pg. 664
- Qasim, pg. 243
- Qasim, pg. 257
- Hammer, pp. 390, 393, 394
- Mays, pg. 20.21
- Peters & Timmerhaus, pg. 163
- Grogan/ENR, pg. 152
- Huang, pg. 3-104
- WEF y ASCE, pg. 391
- WEF y ASCE, pg. 142, 450-454
- WEF y ASCE, pg. 412-415
- Corbitt, pp. 6.81, 6.83
- WEF y ASCE, pg. 418
- WEF y ASCE, pg. 421
- WEF y ASCE, pg. 422
- WEF y ASCE, pg. 418-422
- WEF y ASCE, pg. 459
- WEF y ASCE, pg. 498
- WEF y ASCE, pg. 398
- GLUMRB, pg. 60-1 a 60-2
- GLUMRB, "separate stage nitrification," pg. 60-2
- GLUMRB, "extended aeration," pg. 60-2
- GLUMRB, "conventional, step aeration, contact stabilization, and carbonaceous stage of separate stage nitrification," pg. 60-2
- GLUMRB, pg. 50-1
- Rattman
- Qasim, pg. 656
- Información proveniente de un vendedor de sistemas de flotación

Cuadro 3. Características tecnológicas de la remoción de las arenas

Categoría de la característica	Categoría tecnológica: Característica	Remoción de las arenas				Grados relativos y justificación							
		Cámara de gravedad	Sistema de vórtice	Caudal horizontal	Cámara aireada	Gravedad ²⁵		Vórtice ²⁵		Horizontal ²⁵		Aireado ²⁴	
						Grado	Justificación	Grado	Justificación	Grado	Justificación	Grado	Justificación
Caudal	Tiempo de detención (min)	1 ¹	0,6-0,9 ²²	0,25-1,5 ²¹	2-5 ¹¹								
	Manejo de la variabilidad		Muy eficaz ²⁶	Menos eficaz ²¹	Muy eficaz ²⁶	+++	• No se requiere control del caudal	+	• Eficaz para una gran variación de caudales	+++	• Difícil de mantener la velocidad con una amplia gama de caudales	+++	• Amplia gama de caudales
	Velocidad de aproximación (m/s)	0,3 ¹	0,6-0,9 ²²	0,15-4 ²⁴	0,6 ²⁶								
Tratamiento	Tasa de remoción de la BOD (% promedio)	Pequeña ¹²	Pequeña ¹²	Pequeña ¹²	Pequeña ¹²								
	Tasa de remoción de los SST (% promedio)	Pequeña ¹²	< 73 de los SS finos ²²	Pequeña ¹²	Pequeña ¹²								
	Productos derivados	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo								
Equipo	Facilidad de operación		Mediana ²²	Difícil ²¹	Mediana ²⁰	++	• Se supone sencilla, pero requiere algunas piezas mecánicas	++	• Diseño patentado	+++	• Se supone que no sea complicada • Buen historial de uso	++	• Se supone que se basa en la familiaridad con los sistemas de aireación
	Necesidad de espacio	Espacio mediano a grande ³	Espacio pequeño ²²			+	• Tanques relativamente grandes	+++	• Requiere un mínimo de espacio • Diámetro 42"	++	• Profund. máx. de 1,5 m x long. máx. de 25 m	+	• Profund. máx. de 5 m x ancho máx. de 25 x long. máx. de 125 m
	Confiabilidad		Confiabilidad mediana ²²	Confiabilidad mediana ²²	Confiabilidad mediana ²²	+++	• Cojinetes y partes móviles por encima de la línea del agua	+++	• No hay cojinetes o piezas sumergidas que requieran mantenimiento	+	• Desgaste excesivo sobre la cadena y otros equipos sumergidos	++	• Se ha observado ciertas deficiencias de rendimiento
	Eficiencia de la robustez		Robustez promedio ²²	Robustez de promedio a baja ²		++	• Depende de la superficie • Compuertas de entrada no pueden ajustar el caudal	++	• Remueve la arena fina	+++	• Puede haber flexibilidad para alterar el rendimiento	+++	• Se adapta a distintas condiciones de terreno
Costo estimado (el tamaño de la planta se supone en 37,854 m ³ /día o 10 mgd)	Capital (en miles de US\$, o bajo, mediano, alto)		Costo bajo a mediano ²²	Costo mediano ²³	Costo mediano a alto ²⁶	++	• Supuesto	+++	• Espacio pequeño y reduce costos de construcción	+++	• No se requiere construcción especial	+++	• Referencia 20
	O&M (en miles de US\$ por año, o bajo, mediano, alto)		Costo bajo ²²	Costo alto ²³	Costo mediano a alto ²⁶	+++	• Véase Confiabilidad	+++	• Véase Confiabilidad y energía eléctrica	++	• La arena se remueve manualmente	+++	• Se requiere mano de obra adicional • Referencia 20
	Energía eléctrica ³⁵ (en miles de US\$/año, o baja, mediana, alta)		Costo bajo a mediano ²²		Costo alto ²⁶	++	• Se presupone que hay ciertos requisitos de energía para el rastrillo del lodo	+++	• Eficiente en energía	+++	• No se requiere grandes equipos	+	• El consumo de energía eléctrica es mayor • Referencia 20

Notas: NA = No aplicable
SST = Sólidos Totales en Suspensión
BOD = Demanda Biológica de Oxígeno

Grados relativos: +++ es mejor que ++, que es mejor que +
O&M = Operación y Mantenimiento
SS = Sólido en Suspensión

Cuadro 4. Características tecnológicas y de diseño de la clarificación/sedimentación primaria y secundaria

Categoría de la característica	Característica	Sedimentación/clarificación primaria o secundaria				Grados subjetivos y justificación por geometría de diseño						
		(Sed. clase II) primaria	(Sed. clase II) intermedia	(Sed. clase II) final	(Sed. clase III) final	Rectangular/circular ¹⁹		Circular ¹⁹		Sobrepuesto ¹⁹		
						Grado	Justificación	Grado	Justificación	Grado	Justificación	
Caudal	Tiempo de detención	1,5-2,5 ⁵										
	Manejo de la variabilidad					++	<ul style="list-style-type: none"> Las variaciones en el caudal no son un problema significativo Sumamente relacionado con el diseño 		<ul style="list-style-type: none"> Las variaciones en el caudal constituyen un problema significativo Sumamente relacionado con el diseño 		<ul style="list-style-type: none"> Las variaciones del caudal constituyen un problema significativo Muy relacionado con el diseño 	
	Velocidad de aproximación											
	Tasa de rebalse	24-	24-	24-	8-13 8-41 8-49							
Composición del influente	Régimen de carga de los SS (kg/m ³ /h)				1-5 (ext) 3-6 (conv) ³⁴							
Tratamiento	Tasa de remoción del BOD (% promedio)	25-40 ⁶ 30-35 ²⁹										
	Tasa de remoción de los SST (% promedio)	50-70 ⁶										
	Productos derivados	Lodo	Lodo	Lodo	Lodo							
Equipo	Facilidad de operación					+++	<ul style="list-style-type: none"> Requisitos mecánicos sencillos 	+++	<ul style="list-style-type: none"> Requisitos mecánicos sencillos 	+++	<ul style="list-style-type: none"> Requisitos mecánicos sencillos 	
	Necesidad de espacio					++	<ul style="list-style-type: none"> Longitud : 15-90 cm; ancho: 3-24 cm Construcción de muro medianero es ventajoso para espacios pequeños 	+	<ul style="list-style-type: none"> Diámetro: 3-90 m Se utiliza cuando no hay restricciones en el tamaño del terreno 	+++	<ul style="list-style-type: none"> Para aquellos lugares en donde hay limitación en cuanto a terreno 	
	Confiabilidad	Gran Confiabilidad					++	<ul style="list-style-type: none"> Supuesto 	+++	<ul style="list-style-type: none"> Utiliza equipo de remoción de lodo que no presenta problemas 	+++	<ul style="list-style-type: none"> Se ha utilizado con éxito por 20 años en el Japón
	Robustez						+++	<ul style="list-style-type: none"> La eficiencia de remoción es mejor que el diseño circular 	++	<ul style="list-style-type: none"> Menor eficiencia de remoción que el diseño rectangular 	++	<ul style="list-style-type: none"> Supuesta
Costo estimado (suponer tamaño de la planta en 37.854 m ³ /d ó 10 mgd)	Capital (en miles de US\$, o bajo, mediano, alto)	520 ¹⁰				++ +++	<ul style="list-style-type: none"> Si se construye un muro medianero 	+++	<ul style="list-style-type: none"> Paredes más delgadas y menos costosas que los tanques rectangulares 	+++	<ul style="list-style-type: none"> Poca necesidad de espacio Bajo costo de construcción 	
	O&M (en miles de US\$/año o bajo, mediano, alto)	45 ¹⁰				+++	<ul style="list-style-type: none"> Pocas partes sumergidas ocultas 	++	<ul style="list-style-type: none"> Los sellos cerca del fondo del clarificador requieren mantenimiento 	+	<ul style="list-style-type: none"> El mantenimiento en el nivel subyacente es difícil Tiene espacios restringidos 	
	Energía eléctrica (US\$1.000/año, o baja, mediana, alta)											

Notas: NA = No aplicable
TSS = Sólidos Totales en Suspensión
SS = Sólidos en Suspensión
BOD = Demanda Biológica del Oxígeno
O&M = Operación y Mantenimiento
Sed = Sedimentación

Grados relativos: +++ es mejor que ++ que es mejor que un +
Supuesto: cuando no hay información disponible³¹. Se supone el grado
ext = precedido por un tratamiento prolongado de lodo activado
conv = procesado por tratamiento convencional de lodo activado

A. La cuenca de sedimentación recibe aguas negras no tratadas antes del tratamiento biológico. La sedimentación de Clase II es común para este influente.
B. El tanque de sedimentación entre dos procesos biológicos de película fija (por ejemplo, filtros percoladores) o entre un proceso de película fija y una aireación biológica subsiguiente. Se supone una sedimentación de Clase II.
C. El tanque de sedimentación después de la utilización de un filtro biológico de película fija. Se supone una sedimentación de Clase II.
D. El tanque de sedimentación después de un proceso de lodo activado. La sedimentación Clase II se caracteriza por una alta concentración de S.S.

Cuadro 5. Características y grados relativos de las tecnologías de tratamiento físicas de las aguas negras y del lodo – flotación

Categoría de la característica	Categoría tecnológica: Característica	Flotación		Grados subjetivos y justificación			
		Aire disuelto	Al vacío	Grado	Aire disuelto Justificación	Grado	Al vacío Justificación
Caudal	Tiempo de detención (min)	0-5-3 ⁸					
	Tasa de rebase (m ³ /día/m ²)	20-325 ⁸	200-400 ⁸				
Composición del efluente	Velocidad de carga de los SS (kg/m ² /h)	5 ³¹	5 ¹⁴				
Tratamiento	Tasa de remoción de los TSS (% promedio)	0,97 ³¹	x97 ¹⁴				
	Tasa de remoción del BOD (% gama)	40-60 ³⁶					
	Productos derivados	Lodo	Lodo				
Equipo	Facilidad de operación			+++	• Arranque, encendido y apagado rápidos y fáciles ⁴	+++	• Arranque, encendido y apagado rápidos y fáciles ⁴
	Necesidad de espacio			+++	• Proceso compacto ⁴	+++	• Proceso compacto ⁴
	Robustez			++	• Normalmente responde más rápidamente que los clarificadores cuando hay cambios en la calidad del agua de entrada ⁴	++	• Menos eficaz que la DAF ⁸ para remover una gran gama de SS ⁸
Costo estimado (suponer el tamaño de la planta en 37.854 m ³ /día, o 10 mgd)	Capital (en miles de US\$, o bajo, mediano, alto)			+++	• Menor costo que al vacío ⁸	++	• Costo mayor en comparación con la DAF ⁸ pero más bajo que con los clarificadores rectangulares y circulares ⁸
	O&M (miles de US\$/año o bajo, mediano, alto)			+++	• Costos de O&M menores que al vacío, pero más altos que en la sedimentación por gravedad ⁸	+	• Alto costo de O&M en comparación con la DAF ⁸ , aproximadamente el mismo costo que los clarificadores rectangulares y circulares ⁴
	Energía ³⁵ (miles de US\$/año o baja, mediana, alta)			+++	• Requiere menos energía que el proceso al vacío, pero es mayor que en la sedimentación por gravedad ³ ; sin embargo, puede que la flotación requiera menos energía para la manipulación del lodo (véase el texto, sec. 4.1.5)	+	• Todos los sistemas de flotación tienen costos mayores de energía y de las sustancias químicas que el sistema de sedimentación por gravedad ⁸ ; sin embargo, pueda que la flotación requiera menos energía para la manipulación del lodo (véase el texto, sec. 4.1.5)

Notas: NA = No aplicable
TSS = Sólidos en Suspensión Totales

BOD = Demanda Biológica de Oxígeno
O&M = Operación y Mantenimiento

Grados relativos: +++ es mejor que ++ que es mejor que +

REFERENCIAS

1. Corbitt, pg. 6.75	13. Hammer, pg. 390, 393, 394	25. WEF y ASCE, pg. 418-422
2. Corbitt, pg. 6.78	14. Mays, pg. 20-21	26. WEF y ASCE, pg. 459
3. Corbitt, pg. 6.79	15. Peters & Timmerhaus, pg. 163	27. WEF y ASCE, pg. 498
4. Pontius, pp. 446-448	16. Grogan/ENR, pg. 152	28. WEF y ASCE, pg. 398
5. Hicks, pg. 11.27	17. Huang, pg. 3-104	29. GLUMRB, pg. 60-1 a 60-2
6. Tchohanoglous, pg. 473	18. WEF y ASCE, pg. 391	30. GLUMRB, "separate stage nitrification," pg. 60-2
7. Corbitt, pg. 6.89	19. WEF y ASCE, pg. 142, 450-454	31. GLUMRB, "extended aeration," pg. 60-2
8. Corbitt, pg. 6.97	20. WEF y ASCE, pg. 412-415	32. GLUMRB, "conventional, step aeration, contact stabilization, and carbonaceous stage of separate stage nitrification," pg. 60-2
9. Qasim, pg. 662	21. Corbitt, pp. 6.81, 6.83	33. GLUMRB, pg. 50-1
10. Qasim, pg. 664	22. WEF y ASCE, pg. 418	34. Rattman
11. Qasim, pg. 243	23. WEF y ASCE, pg. 421	35. Qasim, pg. 656
12. Qasim, pg. 257	24. WEF y ASCE, pg. 422	36. Información proveniente de un vendedor de sistemas de flotación

3.2 Coagulación

Las sustancias químicas de coagulación o floculación se agregan a las aguas negras a fin de aumentar el tamaño de las partículas así como la densidad de los sólidos precipitados, aumentando así la tasa de sedimentación. La selección del coagulante depende de los precipitados particulares a ser sedimentados. El coagulante más popular es el sulfato de aluminio (alumbre). Generalmente también se utilizan sales de hierro, pero éstas son más difíciles de manipular. También se utiliza la cal para precipitar el carbonato de calcio y el ortofosfato, pero no se le considera un verdadero coagulante. Las tasas de dosificación varían de 75 a 250 mg/l para el alumbre (pH de 4,5 a 7,0), 35 a 200 mg/l para las sales de hierro (pH de 4,0 a 7,0), y 150 a 500 mg/l para la cal (pH de 9,0 a 11,0). En el Cuadro 6 figuran las ventajas y desventajas de algunos de los coagulantes más comunes.

Cuadro 6. Comparación de los coagulantes

Sustancia química	Ventajas	Desventajas
Alumbre	Fácil de manipular y utilizar; se utiliza comúnmente, y produce menos lodo que la cal.	Agrega sólidos disueltos al agua; funciona en una gama de pH limitada, de 6,8 a 7,5.
Cloruro de hierro	Gama más amplia de pH, de 4 a 11, ayuda en la deshidratación del lodo.	Agrega sólidos disueltos al agua.
Sulfato de hierro	Funciona en dos gamas de pH, de 4 a 6, y de 8,8 a 9,2.	Agrega sólidos disueltos al agua; puede que se requiera agregar alcalinidad.
Sulfato ferroso	No es tan sensible como la cal en lo que respecta al pH.	Agrega sólidos disueltos al agua; puede que se requiera agregar alcalinidad.
Cal	Se usa ampliamente y es eficaz; puede que no agregue sólidos disueltos; el lodo es más fácil de deshidratar.	Depende mucho del pH; produce grandes cantidades de lodo; una sobredosis puede dañar la calidad del agua.
Polímero	Dosis pequeña; fácil de manipular y utilizar.	Una dosis incorrecta podría conducir a una formación deficiente de flóculos; alto costo por unidad (US\$ por kilo seco).

Fuente: Robert Corbitt, Standard Handbook of Environmental Engineering (New York: McGraw-Hill, 1989).

3.3 Tratamiento biológico

El tratamiento biológico de las aguas negras remueve materia orgánica a través del metabolismo o digestión biológicos. Ello puede lograrse de manera anaeróbica (sin oxígeno) o aeróbica (con oxígeno). Existe una serie de enfoques para ambos tipos de

sistemas biológicos. En general, la digestión anaeróbica se utiliza para reducir el volumen del lodo o, a nivel de la industria, para tratar o pretratar efluentes muy concentrados. Algunos sistemas incluyen elementos de tratamiento tanto aeróbicos como anaeróbicos. En general, las plantas de tratamiento de aguas negras utilizan sistemas biológicos aeróbicos para cumplir con las normas de tratamiento secundarias relativas a la remoción de la BOD y de los sólidos en suspensión. Puede que ocurra también cierto grado de remoción de nutrientes.

3.3.1 Digestión anaeróbica

La *digestión anaeróbica* es la degradación por microorganismos sin la presencia de oxígeno; se utiliza para descomponer los desechos que contienen altos niveles de componentes orgánicos fermentables. Se usa principalmente en el tratamiento de aguas negras municipales a fin de reducir el volumen excesivo de lodo producido en la sedimentación primaria y en el tratamiento biológico secundario. La digestión anaeróbica también puede utilizarse antes de la digestión aeróbica en aquellas situaciones en las que todavía existe un alto contenido de sólidos orgánicos y en suspensión en las aguas negras después de la sedimentación primaria.

El metano, que puede utilizarse como combustible para compensar los costos de energía eléctrica de la planta, se genera a través de la digestión anaeróbica. Se produce ácido sulfhídrico en pequeñas cantidades, así como hidrógeno y monóxido de carbono.

Los digestores anaeróbicos pueden ser sistemas de *crecimiento en suspensión* o de *película fija*. En un sistema de crecimiento en suspensión, los microorganismos están en suspensión en el agua. En los sistemas de película fija, los microorganismos están adheridos a una matriz. Los tipos principales son los siguientes:

1. Sistemas de crecimiento en suspensión
 - a) Lagunas anaeróbicas
 - b) Proceso de contacto anaeróbico
 - c) Cobija anaeróbica ascendente
2. Sistemas de crecimiento fijo
 - a) Filtro anaeróbico para la corriente ascendente (con empaquetadura)
 - b) Filtro anaeróbico para la corriente descendente (con empaquetadura)
 - c) Lecho fluidizado anaeróbico (con arena o cuentas como medio)
3. Sistemas combinados en suspensión/de crecimiento fijo

La digestión anaeróbica es un proceso de biodegradación capaz de manejar corrientes de desechos acuosos de gran concentración que no podrían ser tratados de manera eficiente con procesos de biodegradación aeróbica. Entre las ventajas de los sistemas anaeróbicos en comparación con los aeróbicos se encuentran:

1. La capacidad de descomponer ciertos químicos orgánicos halogenados

2. Producción pequeña de los lodos de biomasa que requieren mayor tratamiento y eliminación
3. Costo bajo
4. Consumo pequeño de energía
5. Generación de gas de metano que puede recuperarse para fines de energía

Sin embargo, debido a que la tasa de crecimiento de las bacterias anaeróbicas es más lenta que la de las bacterias aeróbicas, puede que los sistemas anaeróbicos necesiten más tiempo que los aeróbicos para recuperarse de trastornos en las condiciones. Entre las desventajas de los sistemas anaeróbicos se encuentran:

1. El potencial de un choque explosivo de la biomasa, y que se cancele la biodegradación debido a variaciones en las características de la corriente de desechos.
2. Un caudal pequeño debido al proceso lento de biodegradación (se requieren dos procesos).
3. Necesidad frecuente de tratamiento adicional del efluente antes de ser descargado fuera del lugar de tratamiento.
4. Potencial de generación de malos olores en los desechos que contienen azufre.

En los Cuadros 8 y 9 se presenta una matriz de las características de las tecnologías de digestión anaeróbica, aeróbica e híbrida.

3.3.2 Tratamiento biológico aeróbico y métodos híbridos

La digestión aeróbica es realizada por microorganismos en la presencia de oxígeno. Generalmente, este paso produce agua que cumple con las normas de tratamiento secundario. Los procesos principales de digestión aeróbica incluyen lodo activado, sistemas de lagunas aeróbicas, filtros de percolación y contactores biológicos rotatorios. Estos sistemas incluyen un gran número de variedades. Asimismo, existen sistemas híbridos, tales como las lagunas facultativas, que combinan el tratamiento aeróbico y anaeróbico. En los Cuadros 8 y 9 se incluyen las tecnologías de tratamiento biológico anaeróbico junto con las características de los sistemas aeróbico e híbrido.

El proceso de *lodo activado* se utiliza principalmente para remover materiales orgánicos solubles. Este proceso—que existe en una serie de variedades, algunas patentadas—se lleva a cabo principalmente en reactores biológicos aireados. La inoculación continua del lodo resulta de la etapa de clarificación subsiguiente. Este reciclaje alarga el tiempo medio de residencia del lodo, dándole a los microorganismos presentes la oportunidad de adaptarse a los nutrientes disponibles. Los sistemas de lodo activado sólo pueden tratar corrientes de desechos orgánicos acuosos cuyo contenido de sólidos en suspensión sea inferior al 1%, y no pueden tolerar choques explosivos de materiales orgánicos concentrados. Asimismo, debe mantenerse un pH adecuado (6 a 8) y suficiente oxígeno disuelto (un mínimo de 1 a 2 mg/l) en el tanque de aireación para mantener un sistema saludable y activo. La temperatura de funcionamiento óptima oscila, en general, entre 25 y 32°C.

La *oxigenación pura* es una variación del proceso de lodo activado en la que se utiliza oxígeno de gran pureza, en vez de aire, para el tratamiento aeróbico. El oxígeno puede suministrarse a partir de generadores de gas in situ, con un depósito de oxígeno líquido como respaldo. El tanque de aireación se cubre, lo que contribuye a eliminar los malos olores y a mantener la temperatura durante épocas de frío.

Normalmente, los sistemas de *digestión aeróbica termofílica autotérmica* (ATAD) son procesos aeróbicos de dos etapas que funcionan bajo condiciones de temperatura termofílicas (40° a 80°C) sin calor adicional. Los sistemas ATAD pueden utilizarse en vez de los procesos anaeróbicos para efluentes de mucha concentración. Asimismo, los sistemas de etapa previa también sirven para la digestión termofílica, y normalmente se incorporan en el proceso de tratamiento antes de la digestión anaeróbica convencional.

El sistema ATAD ofrece una serie de beneficios: una gran capacidad de desinfección, reducción del mal olor, necesidad pequeña de espacio y tanques, y una tasa alta de tratamiento del lodo. Es una tecnología relativamente sencilla que es fácil de operar (supervisión automática o equipo de control y no se requiere personal a tiempo completo) y económica, sobre todo para instalaciones pequeñas. Bajo condiciones autotermofílicas, la concentración de los desechos debe ser mayor a los 30.000 mg de demanda química de oxígeno por litro (COD/l), el reactor debe aislarse y cubrirse, y se requiere un sistema de aireación relativamente eficiente (una eficiencia de transferencia de aproximadamente 12 por ciento).

La tecnología de *columna profunda* es un tipo de proceso de lodo activado. Consiste en una columna o chimenea vertical de unos 40 a 150 m de profundidad y un diámetro de 1 a 7 m. Por lo tanto, esta tecnología ocupa relativamente menos espacio en el terreno que muchas alternativas. La presión del agua a profundidades más bajas entraña mayores concentraciones de oxígeno disuelto y, por lo tanto, una mayor actividad biológica cuando las concentraciones de BOD del influente son relativamente altas.

La tecnología del *reactor de lotes en secuencia* (SBR) es similar al proceso de lodo activado. La diferencia principal es que el ciclo de tratamiento de cinco etapas se lleva a cabo en un tanque, en lotes. Ello ofrece una enorme flexibilidad, con ventajas inherentes en lo que respecta al diseño, proceso y operaciones. Se ha demostrado que la tecnología SBR logra manejar mayores caudales y cargas más grandes, con mejor calidad del efluente, que las instalaciones de lodo activado. Debido a que sólo se requiere un tanque, las necesidades de capital y espacio son menores que en el proceso de lodo activado.

Los *filtros biológicos percoladores o de escurrimiento* constituyen una alternativa popular al proceso de lodo activado. Una película o babaza de microorganismos vive en una aglomeración sólida que llena un recipiente cuyo objetivo es permitir que el aire entre a la porción inferior del lecho. La actividad biológica, y no la filtración física, remueve los contaminantes. Los filtros biológicos de régimen lento generalmente resultan en efluentes más limpios y nitrificados que los producidos por el tratamiento de lodo activado. Asimismo, la experiencia ha demostrado que estos filtros son menos sensibles a los choques explosivos de sustancias tóxicas que los procesos de lodo

activado. Sin embargo, las unidades de lodo activado son, en algunos sentidos, superiores a los filtros biológicos percoladores. Véase el Cuadro 7.

Cuadro 7. Comparación entre el filtro percolador y el proceso de lodo activado

Factor	Filtro percolador	Lodo activado
Costos de capital	Altos	Bajos
Costos de explotación	Bajos	Altos
Necesidad de espacio	Grande	Pequeña
Control de la aireación	Parcial	Completo
Control de temperatura	Difícil	Completo
Sensibilidad a la variación alimentadora	Bastante insensible	Más sensible
Recuperación cuando ocurren trastornos	Lenta	Bastante rápida
Claridad final del efluente	Buena	No tan buena
Problemas con moscas y malos olores	Grandes	Pequeños

El *contactor biológico rotatorio* (RBC) es una variación de los reactores aeróbicos de película fija tales como el filtro percolador. En los RBC la película fija se adhiere a un tambor que rota a una velocidad de aproximadamente 1 a 7 revoluciones por minuto a través de la corriente de aguas negras. El RBC requiere sólo 10% de la superficie de terreno en comparación con el filtro percolador. Asimismo, ofrece buena resistencia a cambios repentinos en las condiciones de operación y tiene una serie de ventajas en comparación con otros tipos de tratamientos biológicos. Su funcionamiento es sencillo, no requiere mucha energía eléctrica y su eficiencia de tratamiento es alta (aunque no tanto como los procesos convencionales de lodo activado). Los sistemas RBC pueden utilizarse tanto en la modalidad de caudal continuo como en lotes, y pueden utilizarse de manera aeróbica o anaeróbica. La eficiencia se ve afectada por el tiempo de retención hidráulica así como por la velocidad de rotación de los discos.

La *torre biológica* se parece al filtro percolador, salvo que el medio plástico se utiliza como matriz para el crecimiento microbiano. Su altura (hasta 12 m) y su superficie específica permiten un uso más eficiente del terreno. En comparación con las lagunas aireadas, las torres biológicas consumen menos energía y ocupan menos superficie al mismo tiempo que incrementan al doble, o más, la transferencia de masa de oxígeno en las reacciones de tratamiento aeróbico. Las torres manejan concentraciones de COD de entre 1 y 12 g/l.

Las *lagunas de estabilización facultativa (aeróbicas-anaeróbicas)* estabilizan los desechos a través de una combinación de bacterias aeróbicas, anaeróbicas y facultativas. La laguna facultativa es fácil de operar y mantener. Sin embargo, se requieren grandes superficies terrestres para que las cargas de la demanda bioquímica de oxígeno (BOD₅) de la laguna se mantengan dentro de una gama adecuada. En lo que respecta a las aguas negras no tratadas, la capacidad de tratamiento facultativo de la laguna generalmente no es mayor que la del tratamiento secundario. Debido al potencial de generación de malos

olores, estas lagunas deben ubicarse lejos de lugares residenciales o de cualquier zona con potencial de ser poblada (a una distancia mínima de 0,4 km). También deben tomarse en cuenta los aspectos específicos del sitio tales como la topografía, la dirección de los vientos y el uso que se le dará a la tierra.

Con frecuencia, las *lagunas aireadas* son modificaciones de lagunas facultativas sobrecargadas que requieren aireación para suministrar oxígeno adicional con miras a un rendimiento adecuado del tratamiento.

Las *lagunas de estabilización de baja velocidad y de maduración terciaria* tienen como objetivo la clarificación y nitrificación estacional de los efluentes resultantes del tratamiento secundario. Sus mecanismos biológicos son similares a los de otros procesos aeróbicos de crecimiento en suspensión. Se requiere un tiempo mínimo de detención de 18 a 20 días para digerir completamente los sólidos residuales. Este método sólo da cabida a cargas cuya concentración de sólidos es pequeña.

En los *sistemas acuáticos*, las aguas negras se tratan principalmente a través del metabolismo bacteriano y de la sedimentación física como ocurre en los sistemas convencionales de filtros percoladores. Las plantas acuáticas mismas proporcionan poco tratamiento de las aguas negras (aun cuando hay algunos sistemas en los que los agentes químicos contaminantes pueden ser absorbidos por la planta). Más bien, son un componente del entorno acuático que mejora la capacidad de tratamiento de las aguas servidas así como la confiabilidad del entorno mismo.

Los sistemas de plantas acuáticas pueden diseñarse y utilizarse de manera a cumplir con una serie de tareas de tratamiento de las aguas negras, pero su diseño y explotación no siempre son fáciles. Los sistemas de jacintos son susceptibles a las temperaturas frías y podrían verse afectados por métodos biológicos introducidos para controlar el crecimiento de las plantas en el medio ambiente natural. Los mosquitos también pueden ser una consideración importante en el diseño y explotación de los sistemas de plantas acuáticas. Por último, aunque los sistemas de jacintos acuáticos podrían servir para la remoción de nutrientes, la capacidad de tratamiento y confiabilidad de los efluentes de valor muy bajo son limitadas.

Cuadro 8. Matriz de tratamiento biológico de las aguas negras

Categoría	Característica	Lodo activado					Crecimiento biológico adherido				Lagunas aeróbicas			Sistemas de plantas acuáticas (Jacinto)			
		Convencional	Oxigenación pura	Aireación prolongada	Columna profunda	Reactor de lotes en secuencia	Percolación a baja velocidad	Percolación a alta velocidad	Torre biológica	Contactor biológico rotatorio	Aeróbicas (terciarias)	Facultativas	Aireadas	No aireadas	Aireadas		
Caudal	Capacidad (tiempo de detención)	4-8 h ⁶	2-4 h ⁶	18-36 h ⁶ 18-24 h ¹⁰	0,4-6,2 h ¹²	2-4 h	1-4 m ³ /d/m ² ⁶	8-41 m ³ /d/m ² ⁶	28-122 m ³ /d/m ² ⁵	0,03-0,08 m ³ /d/m ² ⁶	5-20 d ⁸	30-180 d ⁸ 20-180 d ¹⁰	5-20 d ⁶ 3-20 d ¹⁰	10-36 d ⁷	4-8 d ⁷		
	Efecto de la variabilidad	++	++	+++	+++	++++	+++	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	++		
	Facilidad de expansión	++	++	++	+	++	++	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++		
Composición del influente	Límites del influente (Kg BOD ₅ por m ³ -d)	0,4-0,8 ⁶	0,8-2,4 ⁶	0,15-0,25 ⁶	0,1-2,0 ¹²	Depende del proceso	0,1-0,4 ⁶	0,4-1,6 ⁶	1,6-8 ⁶	1,6-8 ⁶	0,03-0,06 ⁶		0,001-0,008 ⁶	0,008-0,001 ⁷	0,002-0,004 ⁷		
	Efecto de la variabilidad	++ ³	++	++	++	++++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++		
	Efecto de las características	Los microorganismos aeróbicos son afectados por el pH, el oxígeno disuelto, los sólidos en suspensión, la relación alimentos/microorganismos, y la temperatura. ⁶												Circunstancias de la naturaleza ⁷			
Tratamiento	Remoción del BOD ₅ soluble	80-95% ⁵ 85-95% ¹¹	85-95% ⁵	80-95% ⁵ 90-98% ¹¹	86-98% ¹²	80-95% ⁵	80-90% ⁶ 70-90% ¹¹	65-85% ⁶ 75-95% ¹¹	40-70% ⁶	80-90% ⁶	80-95% ⁶	75-95% ⁶	80-85% ⁶ 80-95% ¹⁰	56-97% ⁶	85-92% ⁷		
	Remoción de los nutrientes											10-50% ^{10p}	10-20% ^{10p}				
	Productos derivados producidos	Lodo activado por desechos, 1.000-5.000 mg/L, Sólidos en suspensión en licor mixto (MLSS)				<20 mg/L BOD	Lodo activado				Efluente (continuo); Dragado (periódico)			Efluente, dragado			
	Posibilidades de mejoramiento	++	++	++	++	+++	++	+++	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	
Equipo	Nivel de capacidad técnica	++++	++++	+++	++++	+++	+++	+++	++++	++++	+	+	++	+	++		
	Requisitos de espacio	++	++	+++	+	++	+++	+++	++	+++	++++	++++	++++	++++	++++		
	Requisitos de temperatura	Buen control de la temperatura ¹					Disminución de la tasa @<15°C ² Difícil de controlar ³				13-32°C ²			Gama de 0-40°C, óptimo 20°C ²		Disminución de 1 tasa @<10°C ⁷	
	Confiabilidad	++++	+++	++++	++++	++++	+++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	
Robustez de la tecnología	+++	+++	+++	+++	++++	++++	++++	+++	++++	++	++	++	++	++	++		
Costo (para una carga hidráulica de 37,8 mic)	Capital: (millones de US\$)	7,43		12,6				5,04				4,68	0,93				
	Operación y mantenimiento (por año)	4.300 horas, US\$230.000						4.400 horas, US\$80.000				0,05	0,135				
	Energía eléctrica (kWh por año)	2,75						ver clarificador									

Nota: + significa un valor bajo, ++++ significa un valor alto

¹Metcalf y Eddy, Capítulo 12

²Metcalf y Eddy, Cuadro 8-7

³Noyes

⁴Metcalf y Eddy, Capítulo 8

⁵Metcalf y Eddy, Capítulo 5

⁶Corbett, Capítulo 6

⁷Metcalf y Eddy, Cuadro 13-22

⁸Metcalf y Eddy, Capítulo 11

⁹Gerheart

¹⁰EPA/625/R-92/005

¹¹Clasificación de las opciones tecnológicas para el tratamiento de aguas negras

¹²Literatura de vendedores de columnas profundas, "Full Scale Deep Shaft Plants – Municipal"

Cuadro 9. Matriz del tratamiento biológico de las aguas negras y del lodo

		Digestión anaeróbica		Termofílica autotérmica
		Tasa estándar (mesofílica)	Tasa alta (termofílica)	Digestión aeróbica
Caudal	Capacidad (tiempo de detención)	30-90 d ¹	10-20 d ¹	¾ - 4 d ¹
	Efecto de la variabilidad	Deficiente	Deficiente	Deficiente
	Facilidad de expansión	Promedio	Promedio	Promedio
Composición	Límites del influente (carga del BOD ₅)	0,5-1,6 Kg/m ³ *d ¹	1,6-4,8 Kg/m ³ *d ¹	1,6-4,8 Kg/m ³ *d ¹
	Efecto de la variabilidad	Deficiente ⁴	Deficiente ³	Deficiente ³
	Efecto de las características	pH 6,8-7,2; COD; relación N:P @ 100:1:0,2 ⁶		Limitaciones aeróbicas
Tratamiento	Límites del efluente	3-10% de sólidos ¹	3-10% de sólidos ¹	<70% de sólidos ¹
	Posibilidad de mejoramiento	Promedio	Promedio	Promedio
	Productos derivados producidos	Licor digerido, gas (metano)		
Equipo	Nivel de capacidad técnica	Grande	Grande	Grande
	Necesidad de espacio	Mayor que la de régimen alto o ATAD	Mediano	Mediano
	Requisitos de temperatura	30-38°C	49-57°C	45-65°C
	Confiabilidad	Buena, tiende a la corrosión		
	Robustez de la tecnología	Buena	Buena	Buena
	Costo de capital			
	Costo de explotación			
	Tecnología probada			

¹ Metcalf y Eddy, Capítulo 12

² Metcalf y Eddy, Cuadro 8-7

³ Noyes, Robert, Unit Operations in Environmental Engineering

⁴ Metcalf y Eddy, Capítulo 8

⁵ Metcalf y Eddy, Capítulo 5

⁶ Corbitt, Robert, Standard Handbook of Environmental Engineering, Capítulo 6

⁷ Metcalf y Eddy, Cuadro 10-17

⁸ Metcalf y Eddy, Capítulo 11

⁹ Gerheart, Robert A. Municipal Wastewater Treatment Technology, "Use of Constructed Wetlands to Treat Domestic Wastewater, City of Arcata, California", Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ, 1993

¹⁰ EPA/625/R-92/005

¹¹ Clasificación de las Opciones Tecnológicas para el Tratamiento de Aguas Negras

¹² Literatura del vendedor de la columna profunda, "Full Scale Deep Shaft Plants—Municipal"

3.4 Tratamiento avanzado

El tratamiento avanzado incluye una serie de enfoques físicos, químicos y biológicos para remover los nutrientes (por ejemplo, nitrógeno, fósforo) y compuestos orgánicos refractarios (difíciles de digerir). El efluente resultante del tratamiento avanzado, el tratamiento terciario o la clarificación (polishing) es agua de gran calidad.

Los nutrientes principales que se busca remover son el fósforo y el nitrógeno. En general, dichos nutrientes se remueven parcialmente en plantas típicas de tratamiento de aguas servidas, pero puede que se requieran métodos avanzados para lograr niveles muy bajos de nutrientes en el efluente final.

El método más común para reducir la concentración de fósforo es a través de la precipitación química en el proceso que ya utiliza la planta de tratamiento de aguas negras. Hay una serie de factores que ejercen una influencia sobre la eficacia del proceso de coagulación, tales como el tipo de coagulante utilizado, las características del equipo, las características de las aguas negras, la cantidad de coagulante agregado y el punto en el que se agrega. Las sustancias químicas que se utilizan para realzar la remoción del fósforo aparecen el Cuadro 10. Cuando se agregan coagulantes a un proceso específico en la planta de tratamiento de aguas negras, ello entraña una serie de ventajas y desventajas que figuran en el Cuadro 11.

Cuadro 10. Realce químico de la remoción del fósforo

Etapa	Sustancia química agregada
Sedimentador primario	Alumbre y polímero
	Cloruro de hierro y polímero
	Cloruro de hierro y cal
	Cal
Tanque de floculación	Alumbre y polímero
	Cloruro de hierro y polímero
	Cloruro de hierro y cal
	Cal
Tanque de aireación	Alumbre
	Cloruro de hierro
	Alumbre sódico
Aireación y filtración con medios múltiples	Alumbre
	Cloruro de hierro
	Alumbre sódico
Filtro percolador	Alumbre
	Cloruro de hierro
Filtro percolador, y filtración con medios múltiples	Alumbre
	Cloruro de hierro
Tratamiento secundario convencional (tanque de floculación)	Alumbre
	Cloruro de hierro
	Cal (una o dos etapas)

Modificado del Standard Handbook of Environmental Engineering

Cuadro 11. Sustancias químicas que se agregan para la remoción del fósforo en distintas etapas del tratamiento

Nivel de tratamiento	Ventajas	Desventajas
Primario	Aplicable a casi todas las plantas; mayor BOD y mayor remoción de los sólidos en suspensión; grado más bajo de filtración metálica por el coagulante; se ha demostrado recuperación de cal.	Utilización menos eficiente del coagulante metálico; puede que se requiera polímero para la floculación; el lodo es más difícil de deshidratar que el lodo primario.
Secundario	Costo más bajo; dosis química más baja que el tratamiento primario; mejor estabilidad del lodo activado; no se requiere polímero.	La sobredosis de metal puede causar una baja toxicidad del pH; en aguas negras de baja alcalinidad, puede que se requiera un sistema de control del pH; no se puede utilizar cal debido al pH excesivo; los sólidos inertes se agregan al licor mixto del lodo activado, reduciendo el porcentaje de sólidos volátiles.
Avanzado	Efluente con el nivel de fósforo más bajo; uso de metal más eficiente; se ha demostrado recuperación de la cal.	El costo de capital es más alto; la filtración metálica es más grande.

Fuente: Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse. Metcalf y Eddy.

La eficiencia en la remoción de casi todos los nutrientes sólo puede alcanzarse con una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. El nivel de fósforo y nitrógeno que contiene la corriente del efluente requiere programas de tratamiento avanzados que aprovechen los tres tipos de procesos. Los niveles aproximados de remoción de nutrientes en procesos típicos de tratamiento de aguas negras se presentan en el Cuadro 12. Asimismo, el Cuadro 13 incluye tecnologías que han sido concebidas específicamente para la remoción de los nutrientes, y muestra también su eficacia. La Figura 2 identifica varios procesos existentes de remoción de nutrientes, la mayor parte de los cuales se describen en el Cuadro 14.

Cuadro 12. Operaciones de remoción de nutrientes

	% de remoción de nitrógeno	% de remoción del fósforo
Tratamiento primario convencional	5-10	10-20
Tratamiento secundario convencional	10-30	
Lodo activado convencional		10-25
Filtro percolador convencional		8-12
Contactores biológicos rotatorios convencionales		8-12
Asimilación bacteriana	30-70	
Desnitrificación	70-95	
Algas de cosecha	50-80	
Nitrificación	5-20	
Lagunas de oxidación	20-90	
Punto de cloración	80-95	
Coagulación química	20-30	Véase sal metálica y precip. de cal
Adsorción de carbono	20-30	10-30
Intercambio selectivo de iones	70-90	
Filtración	20-40	20-50
Flotación		50-85 ¹
Depuración de aire	50-90	
Electrodialisis	40-50	
Ósmosis inversa	80-90	90-100
Precipitación con sal metálica	Véase coagulación quím.	70-90
Precipitación con cal	Véase coagulación quím.	70-90
Tratamiento biológico del caudal principal		70-90
Tratamiento biológico del caudal lateral		70-90
Remoción biológica combinada de los N & P		70-90

Modificado del Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse, Metcalf y Eddy.

¹ Información del vendedor de los sistemas de flotación.

Cuadro 13. Eficiencia de los procesos de remoción de los nutrientes

Cantidad de nutriente removida	Remoción del nitrógeno	Remoción del fósforo	Remoción de nitrógeno y fósforo
30% N 30% P	Lodo activado convencional (10-30%).	Lodo activado convencionalmente (10-25%).	Lodo activado convencional
80% N 80% P	MLE A ² /O TM PhoStrip II TM Zanja de oxidación Biodenitro TM Simpres TM UCT y VIP	A/O TM PhoStrip TM Reactores de lote en secuencia (SBR) OWASA	Bardenpho modificado TM A ² /O TM con filtros “denite” PhoStrip II TM Biodenipho TM Lodo activado modificado en operación UCT PhoStrip TM
95% N 98% P	Bardenpho TM en 4 etapas Wuhrman modificado Lodo doble Tanque anóxico postaeración con metanol Filtros de desnitrificación Reactores de lecho fluidizado Zanjas de aislamiento en fases	PhoStrip TM Precipitación química más filtro	Lodo doble Badenpho TM modificado con químicos A ² O TM con filtros “denite” y químicos Tres lodos con químicos

Se supone una concentración típica en las aguas negras de 40 mg/l de nitrógeno y 10 mg/l de fósforo. Modificado de Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. WEF/ASCE

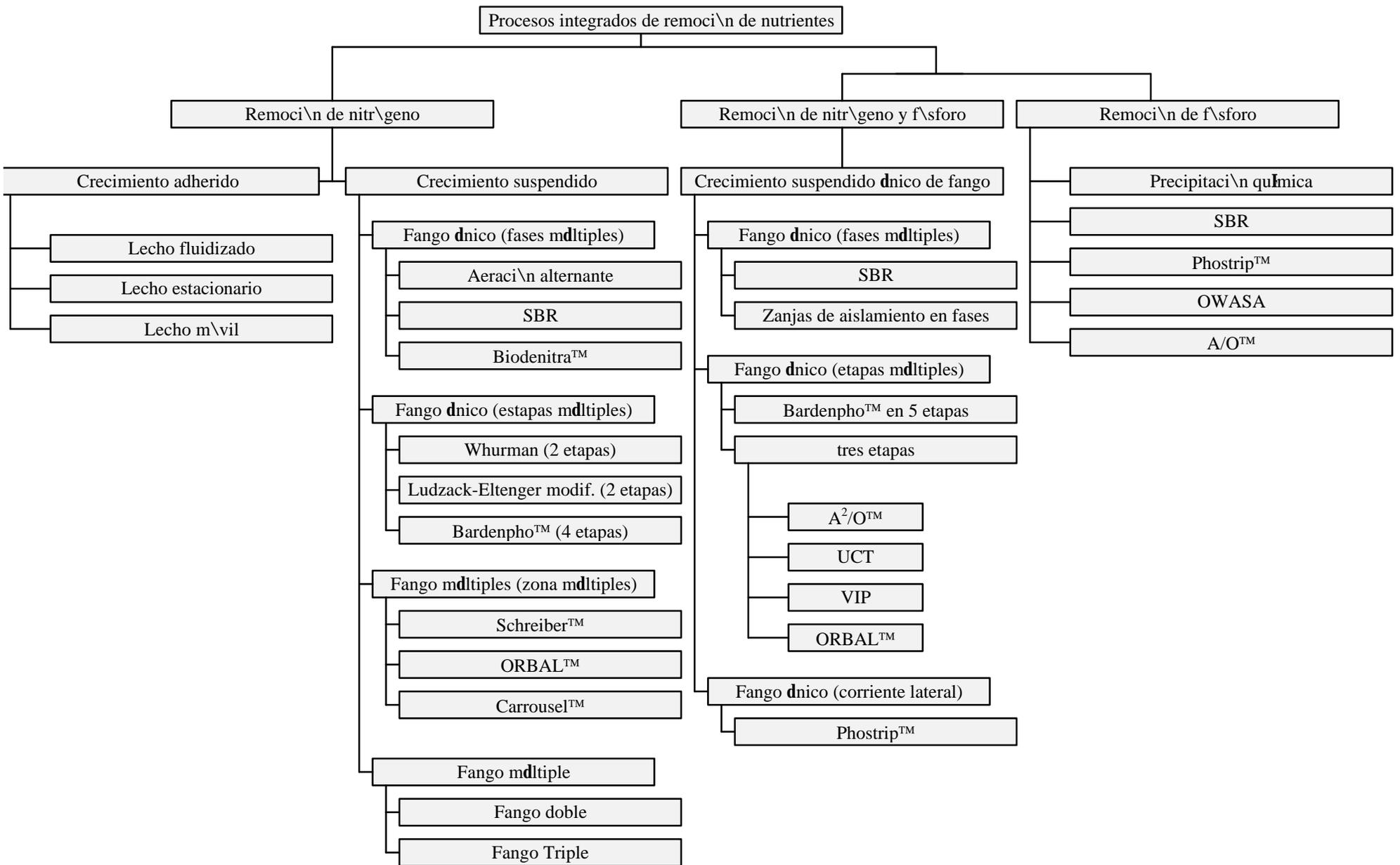


Figura 2. Procesos de Remoción de Nutrientes

Fuente: Water Environment Federation y The American Society of Civil Engineers. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, p 898. 1991.

Cuadro 14. Proceso de remoción de los nutrientes

Proceso	Ventajas	Desventajas
Combinación de oxidación de carbono, nitrificación y crecimiento en suspensión	Tratamiento combinado de carbono y amoníaco en una sola etapa: es posible lograr efluente con bajo contenido de amoníaco; control del inventario de licor-mixto es estable debido a una alta relación BOD ₅ /TKN.	No ofrece protección contra toxicantes; la estabilidad en la operación es sólo moderada; la estabilidad se vincula a la operación de un clarificador secundario para el reingreso de la biomasa; en clima frío se requieren reactores grandes.
Combinación de oxidación de carbono, nitrificación y crecimiento adherido	Tratamiento combinado de carbono y amoníaco en una sola etapa; la estabilidad no se vincula al clarificador secundario ya que los microorganismos se adhieren al medio.	No hay protección contra toxicantes; la estabilidad en la operación es sólo moderada; el amoníaco del efluente está normalmente a 1-3 mg/L (a excepción del RBC); en la mayor parte de los casos la operación en clima frío no es práctica.
Nitrificación y crecimiento en suspensión en etapas separadas	Buena protección contra la mayoría de los toxicantes; operación estable; puede lograrse un bajo contenido de amoníaco en el efluente.	El inventario del lodo requiere un control cuidadoso cuando la relación BOD ₅ /TKN es baja; normalmente el amoníaco del efluente está a 1-3 mg/L; se requiere un número mayor de procesos unitarios en comparación con la combinación de oxidación de carbono y nitrificación.
Nitrificación y crecimiento adherido en etapas separadas	Buena protección contra la mayoría de los toxicantes; operación estable; la estabilidad no está vinculada a un clarificador secundario ya que los microorganismos se adhieren al medio.	El contenido de amoníaco en el efluente está normalmente a 1-3 mg/L; se requiere un número mayor de procesos unitarios que en la combinación de oxidación de carbono y nitrificación.
Combinación de oxidación de carbono, nitrificación y desnitrificación en el reactor de crecimiento en suspensión con la utilización de una fuente endógena de carbono	No se requiere metanol; se requiere un número menor de procesos unitarios; puede lograrse un mayor control de los microorganismos filamentosos en el proceso de lodo activado; puede utilizarse una sola cuenca, adaptable al reactor de lotes en secuencia; el proceso puede adaptarse para incluir la remoción del fósforo biológico.	La desnitrificación ocurre a velocidades muy lentas; el tiempo de detención es más largo y se requieren estructuras mucho más grandes que en el sistema basado en metanol; la estabilidad de la operación está vinculada con el clarificador para el retorno de la biomasa; es difícil optimizar la nitrificación y la desnitrificación por separado;

Proceso	Ventajas	Desventajas
		la biomasa requiere suficiente nivel de oxígeno disuelto para que pueda ocurrir la nitrificación; la remoción del nitrógeno es menor que en el sistema basado en metanol.
Crecimiento en suspensión con la utilización de metanol después de una etapa de nitrificación	La desnitrificación es rápida; se requieren estructuras pequeñas; la operación es de estabilidad demostrada; hay pocas limitaciones en las opciones de la secuencia de tratamiento; el paso de oxidación del exceso de metanol puede incorporarse fácilmente; cada proceso del sistema puede optimizarse por separado; puede lograrse un alto nivel de remoción de nitrógeno.	Se requiere metanol; la estabilidad de la operación se vincula con el clarificador para el retorno de la biomasa; se requiere un número mayor de procesos unitarios para la nitrificación/desnitrificación que en los sistemas combinados.
Crecimiento adherido (columna) que utiliza metanol después de la etapa de nitrificación	La desnitrificación es rápida; se requieren estructuras pequeñas; la estabilidad de la operación ha sido demostrada; la estabilidad no está vinculada con el clarificador como los microorganismos en los medios; las opciones en la secuencia del tratamiento enfrentan pocas limitaciones; es posible lograr un alto nivel de remoción del nitrógeno; cada proceso del sistema puede optimizarse por separado.	Se requiere metanol; no es fácil incorporar el proceso de oxidación para el exceso de metanol; se requiere un número mayor de procesos unitarios para la nitrificación/desnitrificación que en los sistemas combinados.
A/O	Esta operación es relativamente sencilla en comparación con otros procesos; el lodo de aguas negras tiene un contenido de fósforo relativamente alto (3-5%) y sirve de fertilizante; el tiempo de retención hidráulica es relativamente corto; cuando pueden aceptarse niveles menores de eficiencia en la remoción del fósforo, el proceso puede conducir a una nitrificación completa.	No puede alcanzar niveles altos de remoción del nitrógeno y fósforo simultáneamente; el rendimiento de operación en climas fríos es incierto; se requieren relaciones altas de BOD/P; debido al menor tiempo de detención de la célula aeróbica, puede que tengan que utilizarse dispositivos de transferencia de oxígeno a alta velocidad; la flexibilidad en el control del

Proceso	Ventajas	Desventajas
		proceso es limitada.
PhoStrip	Puede incorporarse fácilmente en las plantas existentes de lodo activado; el proceso es flexible; el proceso de remoción del fósforo no se controla a través de la relación BOD/fósforo; existen varias instalaciones en los EE.UU.; el uso de sustancias químicas es significativamente menor que en la precipitación química de caudales principales; puede llegarse a concentraciones de ortofosfato en el efluente, inferiores al 1,5 mg/L.	Requiere que se agregue cal para la precipitación del fósforo; requiere un mayor nivel de oxígeno disuelto en el licor mixto para impedir la liberación del fósforo en el clarificador final; se requiere espacio adicional de tanques para fines de depuración; la escamación de la cal podría convertirse en un problema de mantenimiento.
Reactor de lotes en secuencia	El proceso es muy flexible para la remoción combinada de nitrógeno y fósforo; el proceso es sencillo en lo que respecta a su funcionamiento; los sólidos de licor mixto no pueden sacarse a través de marejadas hidráulicas.	Sólo sirve para corrientes más pequeñas; se requieren unidades redundantes; la calidad del efluente depende de que se cuente con una instalación de decantación confiable; existen pocos datos de diseño.
A ² /O	El lodo de los desechos tiene un contenido de fósforo relativamente alto (3-5%), y sirve de fertilizante; ofrece una mayor capacidad de desnitrificación que el A/O.	El rendimiento de operación en climas fríos es incierto; es más complejo que el A/O.
Bardenpho	Produce la menor cantidad de lodo en comparación con todos los sistemas de remoción biológica del fósforo; el contenido de fósforo del lodo de aguas negras es relativamente alto y sirve de fertilizante; el contenido total de nitrógeno se reduce a niveles inferiores que los de la mayoría de los demás procesos; vuelve la alcalinidad al sistema, reduciendo o eliminando así la necesidad de agregar sustancias químicas; ha sido utilizado ampliamente en Sudáfrica y existen muchos datos al respecto.	El ciclo interno grande aumenta las necesidades de energía de bombeo y mantenimiento; poca experiencia en los EE.UU.; requiere más volumen de reactor que el proceso A ² /O; la sedimentación primaria reduce la capacidad del proceso de remoción nitrógeno y fósforo; se requieren relaciones altas de BOD/P; no se conocen muy bien los efectos de la temperatura sobre el rendimiento del proceso.
UCT	El reciclaje hacia la zona	No existen instalaciones en los

Proceso	Ventajas	Desventajas
	<p>anóxica elimina el reciclaje del nitrato y sirve de mejor entorno para la remoción del fósforo en la zona anaeróbica; requiere un volumen de reactor ligeramente menor que el proceso Bardenpho.</p>	<p>EE.UU.; el ciclo interno grande aumenta las necesidades de energía de bombeo y mantenimiento; no se conocen bien cuáles son las necesidades de sustancias químicas; se requieren relaciones altas de BOD/P; los efectos de la temperatura sobre el rendimiento del proceso no se conocen bien.</p>
VIP	<p>El reciclaje de nitrato hacia la zona anóxica reduce las necesidades de oxígeno y el consumo de alcalinidad; el reciclaje del efluente de la zona anóxica hacia la zona anaeróbica reduce la carga de nitrato sobre la zona aeróbica; puede adaptarse con miras a una remoción del fósforo todo el año y una remoción estacional del nitrógeno.</p>	<p>El reciclaje interno grande aumenta las necesidades de energía de bombeo y mantenimiento; hay pocas instalaciones en operación en los Estados Unidos; las temperaturas bajas reducen la capacidad de eliminar nitrógeno.</p>
Depuración del aire	<p>El proceso puede controlarse en el caso de algunos procesos de remoción de amoníaco; se aplica especialmente cuando se requiere estacionalmente en combinación con un sistema de cal para la remoción de fósforo; el proceso puede atender las normas relativas al nitrógeno total; no es sensible a las sustancias tóxicas.</p>	<p>El proceso es sensible a las temperaturas; la solubilidad del amoníaco aumenta con la reducción de las temperaturas; los requisitos de aire también varían; durante temperaturas más frías puede haber condensación de vapor y formación de hielo; la reacción del amoníaco con el dióxido de azufre puede provocar problemas de contaminación del aire; oxidación de carbonato de las empaquetaduras y tuberías; potencial de ruido y problemas estéticos.</p>
Punto de cloración	<p>Con el control adecuado, puede oxidarse todo el nitrógeno de amoníaco; este proceso puede utilizarse después de los demás procesos de remoción de nitrógeno a fin de perfeccionar dicha remoción; desinfección concurrente del efluente; poca</p>	<p>Podría producir un alto nivel de residuos de cloro que son tóxicos para los microorganismos acuáticos; las aguas servidas contienen una serie de sustancias de demanda de cloro que requieren un alto costo de tratamiento; el proceso es</p>

Proceso	Ventajas	Desventajas
	necesidad de espacio; no es sensible a las sustancias tóxicas y a las temperaturas; bajos costos de capital; puede adaptarse a una instalación existente.	sensible al pH, lo que afecta los requisitos de dosificación; el costo de operación es alto debido a la necesidad de químicos; la formación de trialometano podría tener un efecto sobre la calidad de los suministros de agua; si se agrega cloro aumenta el TDS del efluente; puede que el proceso no esté en capacidad de atender las normas de nitrógeno total; requiere un control cuidadoso del pH para evitar la formación de gas de tricloruro de nitrógeno; requiere un operador sumamente capacitado.
Intercambio de iones	Puede utilizarse cuando las condiciones climáticas inhiben la nitrificación biológica y cuando se requieren normas rigurosas con relación al efluente; produce un efluente cuyo contenido de TDS es relativamente bajo; produce un producto recuperable (amoníaco acuoso); el proceso puede atender las normas de nitrógeno total; facilidad en el control de la calidad del producto.	La materia orgánica en el efluente resultante del tratamiento biológico puede producir obstrucción por resinas; en general, se requiere un tratamiento previo por filtración para evitar la pérdida excesiva de carga debido a la acumulación de sólidos en suspensión; concentraciones altas de otras cauciones reducen la capacidad de remoción del amoníaco; la recuperación para fines de regeneración podría requerir otro proceso unitario (por ejemplo, la depuración del gas); los costos de capital y de explotación son altos; los productos de regeneración tienen que eliminarse; requiere un operador sumamente capacitado.

Fuente: Metcalf y Eddy, Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse

3.5 Desinfección

La desinfección destruye los microorganismos patógenos. La cloración es el método utilizado más ampliamente aunque existen otros tipos de agentes. Como resultado de la preocupación sobre los productos derivados del cloro, se está considerando más la descloración de las aguas desinfectadas antes de la descarga, así como la aplicación creciente de luz ultravioleta para fines de desinfección. El Cuadro 15 señala las características de los diferentes agentes de desinfección.

Estudio de caso: Utilización de lámparas ultravioletas para la desinfección de aguas negras

La planta de tratamiento de aguas servidas de Carters Creek (College Station, Texas) aumentó su capacidad de 8,9 mgd (33,4 millones l/d) a 9,5 mgd (35,7 millones l/d) y puso en marcha tecnologías nuevas, incluida la digestión aeróbica autotérmica y la termofílica (véase la sección 4.3.2), y la desinfección con luz ultravioleta (UV).

Anteriormente, la planta había utilizado cloro para la desinfección. Sin embargo, existían dudas sobre el uso continuo del cloro: la desinfección con cloro genera productos derivados potencialmente peligrosos, y de ahí que el efluente desinfectado tenga que desclorinarse con cuidado para evitar que el oxígeno disuelto se reduzca a niveles por debajo de los requeridos. Hubieran tenido que construirse cuencas de contacto más grandes para garantizar un tiempo de contacto adecuado del cloro, y la municipalidad estaba preocupada sobre el costo de incorporar un sistema depurador para controlar las emisiones de aire de las cuencas nuevas. Más aún, el personal estaba preocupado sobre la seguridad del almacenamiento y manipulación del cloro y de las sustancias químicas de descloración.

A recomendación de una empresa de ingeniería, la municipalidad decidió instalar un sistema de desinfección por luz UV; dicho sistema requiere menos espacio que el de desinfección con cloro. El tiempo de detección con UV es de sólo 12 segundos, en comparación con 20 minutos para el cloro. La cuenca de UV tiene dos canales a fin de que uno pueda funcionar mientras que el otro es objeto de mantenimiento. Cada canal tiene 15 módulos en una formación de 3 pies (0,92 m) por 5 pies (1,54 m), y cada módulo tiene 40 bombillos de UV. El sistema se finalizó en el mes de agosto de 1995, a un costo de US\$800.000. Se calcula que dichos costos se verán compensados en un período de 10 años en comparación con el costo de mantenimiento y mejoramiento del sistema de desinfección con cloro. Se prevé que la ciudad de College Station ahorre más de US\$1 millón a través de la desinfección por luz UV.

Fuente: Wastewater Plant Turns to UV Disinfection, *WasteWater*, Vol. 13, No. 7 (julio/agosto de 1997) p. 46.

Cuadro 15. Características de los agentes de desinfección de las aguas negras

	Ozono	Cloro	Dióxido de cloro	Hipoclorito	Luz ultravioleta
Tamaño de la planta	Mediana a grande ¹	Todos los tamaños ¹	Pequeña a mediana ¹	Todos los tamaños ³	Todos los tamaños ⁴
Límites	No debe utilizarse en caudales complejos de gran concentración afectados por la temperatura	Afectado por la temperatura ¹		Afectado por la temperatura ⁴	Limitado por turbidez ¹
Dependencia sobre el pH	Ligera ⁹	Sí ⁹	No ⁹	Sí ⁴	No ⁹
Efluente	No hay productos finales peligrosos; podría aumentar el BOD en la reacción con materias orgánicas refractarias ³	Podría crear residuos tóxicos que requerirían la descloración antes de su descarga	Residuos moderados, no crea cloraminas ni trihalometanos ³	Podría crear residuos tóxicos; podría requerir descloración antes de la descarga ⁴	No produce residuos
Aumento en los sólidos disueltos	No ⁹	Sí ⁹	Sí ⁹	Sí	No ⁹
Salud/seguridad	Peligro en el almacenamiento y manipulación, pero se genera in situ ³	Peligros en el almacenamiento y manipulación de cloro	Ciertas preocupaciones sobre la seguridad ³	Podría generar gas de cloro	Preocupaciones mínimas ³ , la UV requiere una protección adecuada ⁴
Toxicidad	Tóxico ⁷	Sumamente tóxico ⁷	Tóxico ⁷	Tóxico ⁷	Tóxico ⁷
Costos de operación y mantenimiento	Usa mucha energía, mucho más costoso que el cloro	Costo bajo ⁷	Costo relativamente bajo ³	Costo relativamente bajo ²	Usa mucha energía ⁴ , costo relativamente alto ⁷
Aspectos tecnológicos	La tecnología es relativamente compleja ³ , hay pocos sistemas integrales en operación ⁶	La alimentación es sencilla, técnica bien probada ¹ , sistema de utilización más frecuente ⁴ , complejidad de baja a moderada ³	Moderadamente complejo ³ , no se conoce su utilización en las plantas municipales de los Estados Unidos ⁵	Alimentación sencilla, técnica bien probada, complejidad de pequeña a moderada ⁴	Facilidad de operación de sencilla a moderada, se utiliza en cientos de plantas de tratamiento de aguas negras, su utilización aumenta ⁵
Bactericida	Bueno ³	Bueno ³	Bueno ³	Bueno ³	Bueno ³
Virucida	Bueno ³	Moderado ³	Bueno ³	Moderado ³	Bueno ³

Cuadro 15. Características de los agentes de desinfección de las aguas negras (cont.)

Equipo Adicional	Se requiere generación del ozono in situ, realizada por UV y medios ultrasónicos ¹		Se requiere generación in situ ⁶		
Solubilidad	alta ⁷	leve ⁷	alta ⁷	alta ⁷	N/A ⁷
Estabilidad	inestable ⁷	estable ⁷	inestable ⁷	ligeramente inestable ⁷	N/A ⁷
Tiempo de contacto	breve ³	mediano ³	mediano ³	mediano ⁴	breve ³
Interacción con materiales extraños	oxida la materia orgánica ⁷	oxida la materia orgánica ⁷	grande ⁷	oxidante activo ⁷	ligera ⁷
Penetración	grande ⁷	grande ⁷	grande ⁷	grande ⁷	moderada ⁷
Corrosividad	muy corrosivo ⁷	muy corrosivo ⁷	muy corrosivo ⁷	corrosivo ⁷	N/A ⁷
Capacidad desodorizante	grande ⁷	grande ⁷	grande ⁷	moderada ⁷	ninguna ⁷
Forma ⁸	gas	gas licuado	gas	solución, en polvo o pastilla	N/A
Formula Quimica ⁸	O ₃	Cl ₂	ClO ₂	NaOCl or Ca(OCl) ₂	N/A
Confiabilidad	promedio a buena ³	buena ³	buena ³	buena ³	promedio a buena ³
Flexibilidad	buena ³	buena ³	buena ³		buena ³
Estudios	mediano ⁹	máximo ⁹	mínimo ⁹		mediano ⁹

¹ Unit Operations in Environmental Engineering, R. Noyes, 1993

² Industrial Water Pollution Control, Eckenfelder, 1989

³ Water Quality and Treatment, AWWA, 1990

⁴ Personal communication, Dean Hertert, Sept. 24, 1996

⁵ Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, WEF/ASCE, 1992

⁶ Standard Handbook of Environmental Engineering, R.A. Corbitt, 1989

⁷ Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse, Metcalf & Eddy, 1991

⁸ Wastewater treatment plants, Planning, Design, and Operation, S. R. Qasim, 1994

⁹ Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection, EPA 625/1-86-021, 1986

3.6 Tratamiento del lodo

Las fuentes de lodo en una planta de tratamiento municipal de aguas servidas son el tanque de sedimentación primaria y los clarificadores secundarios. Entre otras, algunas fuentes adicionales de lodo son: la etapa de precipitación química, el proceso de nitrificación-desnitrificación, el cribado, la trituración y la filtración. Según el diseño del proceso, ciertas corrientes de lodo podrían reciclarse hacia una etapa anterior. El lodo producido contiene materiales orgánicos e inorgánicos resultantes de las aguas negras no tratadas, las sustancias químicas agregadas y los sólidos biológicos producidos durante el tratamiento.

Debe eliminarse el exceso de lodo; sin embargo, el transporte y eliminación del lodo no tratado son sumamente costosos debido a su alto contenido de agua. Las plantas de tratamiento de aguas negras utilizan una serie de enfoques para reducir el volumen del lodo así como el contenido de humedad. La digestión anaeróbica (descrita en la sección 3.3.1) reduce el volumen y la masa del lodo. El espesamiento y deshidratación del lodo se logra a través de la centrifugación, la filtración y/o el secado, con una serie de variaciones tecnológicas para cada uno de estos procesos. También pueden utilizarse agentes químicos para ayudar a espesar y deshidratar el lodo. Dichos procesos tienen un enorme efecto sobre la cantidad de lodo que deberá eliminarse finalmente. Si se aumenta la concentración de sólidos del lodo, de 2% a 20%, se reduce el volumen del lodo en un 90%.

En el Cuadro 16 aparecen los procesos disponibles para el tratamiento del lodo de aguas negras. Algunos de estos procesos ya se han descrito en secciones anteriores (por ejemplo, la digestión anaeróbica). El resto de la presente sección se concentrará en estas tecnologías de procesamiento de lodo.

Cuadro 16. Procesos de manipulación del lodo

Operaciones preliminares	Espesamiento	Estabilización	Acondicionamiento	Desinfección	Deshidratación	Secado	Reducción térmica	Remoción
<ul style="list-style-type: none"> • Trituración del lodo • Mezcla del lodo • Almacenamiento del lodo • Remoción de la arena del lodo 	<ul style="list-style-type: none"> • Espesamiento con tambor rotatorio • Espesamiento por gravedad • Espesamiento por flotación • Centrifugación • Espesamiento por cinturón de gravedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidación con cloro • Estabilización con cal • Tratamiento térmico • Digestión anaeróbica • Digestión aeróbica • Compostación 	<ul style="list-style-type: none"> • Acondicionamiento químico • Elutriación • Tratamiento térmico 	<ul style="list-style-type: none"> • Pasteurización • Almacenamiento a largo plazo 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro al vacío • Filtro de presión • Filtro de correa horizontal • Centrifuga • Lecho de secado • Laguna 	<ul style="list-style-type: none"> • Evaporador de efecto múltiple • Secado instantáneo • Secado por aspersión • Secado rotatorio • Secador de hornos múltiples 	<ul style="list-style-type: none"> • Incineración en lecho fluidizado • Combustión instantánea • Coincineración con desechos sólidos • Reactor de pozo profundo vertical • Oxidación con aire húmedo 	<ul style="list-style-type: none"> • Relleno sanitario • Aplicación en terreno • Recuperación • Reutilización • Compostación • Recalcinación

Fuentes: Wastewater Treatment Plants, Planning, Design, and Operations, S.R. Qasim
Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse, Metcalf y Eddy

3.6.1 *Espesamiento del lodo*

El lodo de aguas negras tiene un contenido de más de 90% de agua. Se requiere un espesamiento del lodo a fin de reducir el volumen global de los sólidos y concentrarlos. El proceso de espesamiento reduce la carga para el tratamiento ulterior, reduciendo así el uso de sustancias químicas y la necesidad de equipo grande. Entre los métodos de espesamiento se encuentran la gravedad, la flotación con aire disuelto y la centrifugación. Estos métodos y sus características se presentan en los Cuadros 17 y 18.

3.6.2 *Deshidratación del lodo*

Debe deshidratarse el lodo de aguas servidas a fin de reducir el contenido restante de humedad con miras a la eliminación o transporte del lodo. El lodo resultante puede contener hasta un 30% de sólidos y, para concentrar el lodo aún más, puede llevarse a cabo una etapa de secado. El equipo que se utiliza en general para la deshidratación son centrífugas, lechos de secado, lagunas, prensas de filtro, filtros de correa horizontal y filtros al vacío. Estos métodos y sus características se describen más adelante y se resumen en los Cuadros 19 y 20. Entre otras técnicas de deshidratación se encuentra el congelamiento (que no es muy práctico para el clima del Brasil) y los lechos de caña *Phragmites* (que no se consideran adecuados para las plantas de tratamiento grandes que generan más de 19 millones de litros de lodo por año, debido a problemas en las tuberías y el drenaje). Estas opciones adicionales no se consideran en el presente trabajo.

Lechos de secado de arena: En general, los lechos de arena se utilizan para plantas de tratamiento de aguas negras municipales de escala pequeña a mediana. Requieren muchísimo espacio y el tiempo de secado puede ser largo (Outwater 1994, 82).

Lechos de secado de agua cuniforme: Estos lechos de secado utilizan un tamiz de alambre fino, de acero inoxidable (vida más larga, costo más alto), o un medio de poliuretano de alta densidad (vida más corta, costo más bajo). La malla de acero inoxidable tiene aproximadamente un metro de ancho, es de longitud variable y se coloca sobre pisos de concreto en soportes estructurales. La malla de poliuretano está integrada por piezas entrelazadas autosuficientes que miden 30,5 cm por 30,5 cm, con una altura de 5 cm. Estos sistemas drenan el agua a través de la acción capilar y su capacidad de carga es de aproximadamente 10 kg de sólidos secos por metro cuadrado, el doble de la capacidad de un lecho de secado de arena. Bajo condiciones favorables, el contenido de sólidos del lodo puede llegar a un nivel de 15% a 20% en tres a cuatro días (en comparación con cuatro semanas para el lecho de secado de arena, que requiere una superficie aproximadamente 16 veces mayor). Se requiere cierta destreza para operar estos sistemas correctamente. Los lechos se limpian con un tractor (Outwater 1994, 83-85).

Deshidratación en laguna: Esta es una alternativa sencilla y de bajo costo en climas calientes y secos, donde el costo de la tierra es bajo y donde no hay en la cercanía lugares poblados. Las lagunas requieren superficies de tierra relativamente grandes. El mal olor es difícil de controlar: algunos lodos necesitan ser estabilizados a fin de reducir los malos olores antes de colocarlos en lagunas. Las lagunas son sensibles a las condiciones climáticas; las lluvias desaceleran el espesamiento del lodo, y las lagunas son menos eficientes en climas más fríos. Asimismo, el lodo podría filtrarse en el agua subterránea. El lodo en las lagunas de secado deben vaciarse periódicamente. Si la capa de lodo es de 36 cm o menos, se deshidrata en un plazo de tres a cinco meses (Outwater 1994, 84-85).

Deshidratación con filtro al vacío: Normalmente, el filtro continuo al vacío consiste de un tambor horizontal rotatorio parcialmente sumergido en un embalse de lodo húmedo y no filtrado. Un medio de filtración compuesto de varios tipos de material recubre la cara del tambor y soporta la capa del lodo en deshidratación. El tambor se divide en sectores a lo largo de todo el tambor, cada uno de los cuales opera al vacío a través de válvulas automáticas. A medida que un sector rota a través del embalse se aplica un tratamiento al vacío, ello que resulta en la formación de una capa de lodo en el medio de filtración. El tratamiento al vacío se mantiene en el sector a medida que surge del embalse, lo que resulta en un drenaje continuo de la humedad de la capa de lodo. El drenaje continúa hasta que el sector vuelve a entrar al embalse, en cuyo momento la torta de lodo se raspa automáticamente del medio de filtración. Una de las desventajas principales del filtro tipo tambor es la frecuencia con la cual deben detenerse las operaciones para lavar el medio de filtración (Outwater 1994, 90-91).

Prensas de filtro en correa: El lodo se procesa en tres etapas: acondicionamiento/floculación, drenaje por gravedad y arrastre por compresión. En la primera etapa se agrega un polímero y se mezcla en el lodo. Luego el lodo se bombea hacia una correa móvil porosa en la que el agua liberada durante el acondicionamiento del lodo se drena por gravedad, quedando atrás una lechada de sólidos de lodo floculados. Las paletas agitan el lodo para mejorar la liberación del agua. El drenaje por gravedad después del acondicionamiento inicial del lodo representa un 50% a 75% del agua extraída en el proceso mecánico de deshidratación, y es una etapa fundamental que debe realizarse antes de presionar el lodo entre las dos correas.

En la etapa de compresión, el lodo parcialmente deshidratado se presiona entre dos correas de fibra. Las correas pasan sobre una serie de rodillos que realizan una acción de corte. Al final de la sección de la correa, la torta deshidratada se raspa de la superficie de la correa hacia un cinturón transportador para mayor procesamiento o para su remoción (Outwater 1994, 91-93).

Deshidratación por centrífuga: La deshidratación por centrífuga utiliza la fuerza centrífuga desarrollada a través del giro de un tazón o canasta para separar los sólidos más pesados del lodo de los líquidos. Normalmente se utilizan tres tipos de centrífugas, a saber, un decantador de tazón sólido, una canasta o un disco. La centrífuga de tazón sólido, o el decantador, es el tipo de centrífuga más utilizado. El lodo se bombea a través de una tubería central hacia un tazón rotatorio en el que los sólidos se presionan hacia las paredes internas, y los líquidos más ligeros se agrupan cerca del centro del tazón. Un transportador sinfín o de rodillos saca la torta de lodo del extremo abierto. El concentrado se evacua a través de hoyos en cualquier de los dos extremos del tazón (Outwater 1994, 93-94).

3.6.3 Eliminación del residuo del lodo

El producto final del proceso de tratamiento del lodo de aguas negras debe eliminarse de manera segura, así como eficiente en función de los costos. La eliminación del lodo puede realizarse de una serie de maneras y depende de numerosas variables tales como el costo del transporte, la disponibilidad de terreno, la toxicidad del lodo, el volumen de lodo producido y los contaminantes.

Los métodos de eliminación más comunes son: colocación en rellenos sanitarios, aplicación a la tierra, fijación química, inyección en pozo profundo e incineración. También pueden utilizarse otros métodos según las características del lodo y de la planta de tratamiento, a saber, compostación, pirólisis, oxidación húmeda y recalcinación. La recalcinación permite el reciclaje de cal a partir de la corriente de lodo si el nivel de contaminación y los factores económicos son aceptables. Las características de varias opciones de eliminación del lodo se describen en el Cuadro 21.

Cuadro 17. Métodos de espesamiento del lodo

	Ventajas	Desventajas	Tipo de lodo	Uso y nivel de éxito
Sedimentación por gravedad	Ofrece capacidad de almacenamiento del lodo	Se requiere una gran cantidad de espacio	Primario	Creciente, resultados excelentes
	Requiere pocas destrezas de operación	Puede producir malos olores Produce un porcentaje pequeño de sólidos ¹	Digestión primaria	Ahora no es frecuente, pero es factible
	Los costos de operación y mantenimiento son bajos ¹		Primario y activado por aguas negras	Decreciente, resultados de deficientes a marginales
			Activación por aire	Básicamente nunca se utiliza, resultados deficientes
Gravedad (elutriación)			Digestión primaria, y mezcla activada por aguas negras	Muchas plantas construidas, requiere floculantes
Flotación por aire disuelto	Funcionamiento óptimo con lodos más ligeros Contenido más alto de sólidos que el método de gravedad ¹		Primario y activado por aguas negras	Creciente, buenos resultados si el lodo primario ha sido espesado por gravedad, por separado
Cinturón con tazón sólido			Activado por aguas negras	Poco uso, problemas de captura de sólidos
Centrífuga tipo disco	Poca necesidad de espacio ¹	Costo alto ¹	Activado por aguas negras	Poco uso, siguen recopilándose datos

Modificado del Standard Handbook of Environmental Engineering, R. Corbitt

¹Sludge Management and Disposal, P.N. Chermisinoff

Cuadro 18. Características del espesamiento del lodo

	Necesidad de terreno	Manejo de la variación del caudal	Manejo de la variación en la calidad del influente	Confiabledad	Facilidad de operación y mantenimiento
Gravedad	Moderada	Promedio	Bueno	Buena	Buena
Flotación por aire disuelto	Moderada	Promedio	Bueno	Buena	Promedio
Centrífuga	Mínima	Bueno	Bueno	Buena	Promedio

Modificado de Wastewater Treatment Plants: Planning, Design and Operation, S.R. Qasim

Cuadro 19. Métodos de deshidratación del lodo

	Uso de la torta deshidratada				Características		
	Relleno sanitario	Extensión de la tierra	Secado por calor	Incineración	Tamaño de la planta	Ventajas ¹	Desventajas ¹
Centrífuga (tazón sólido)	Sí	Sí	Sí	Sí		Apariencia limpia, problemas mínimos de mal olor, capacidad de arranque y cierre rápidos. Fácil de instalar. Produce una torta de lodo relativamente seca. La relación costo/capacidad es pequeña.	El desgaste de los rodillos podría requerir mucho mantenimiento. Requiere remoción de la arena y posiblemente un triturador de lodo en la corriente alimentadora. Se requiere personal de mantenimiento muy capacitado. El contenido de sólidos en suspensión en el concentrado es moderadamente alto.
Centrífuga (Canasta)	No	Sí	No	No		Algunas máquinas pueden utilizarse tanto para el espesamiento como para la deshidratación. Puede que no se requiera acondicionamiento químico. Apariencia limpia, problemas mínimos de mal olor, capacidad de arranque y cierre rápidos. Muy flexible en lo que respecta a los requisitos de procesamiento. No se ve afectado por arena. Resultados excelentes con lodos difíciles.	Capacidad de tamaño limitada. A excepción de los filtros al vacío, consume más energía por unidad de lodo deshidratado. La despumación de la corriente podría producir una carga de reciclaje significativa. Para lodos de fácil deshidratación, tiene la relación más alta de costo del capital/capacidad. Para la mayoría de los lodos, produce la concentración más baja de sólidos en la torta de lodo. Vibración.
Lechos de secado	Sí	Sí	No	No	Pequeño	Es el método en el que el costo de capital es más bajo cuando hay terreno fácilmente disponible. Se requiere poca atención y destreza por parte del operador. Consumo de energía pequeño. Apenas requiere sustancias químicas. Es menos sensible a la variabilidad del lodo. Mayor contenido de sólidos que los métodos mecánicos.	Requiere una gran superficie de tierra. Requiere lodo estabilizado. El diseño requiere la consideración de los efectos climáticos. La remoción del lodo requiere mucha mano de obra.

Cuadro 19. Métodos de deshidratación del lodo (continuación)

	Uso de la torta deshidratada				Características		
	Relleno sanitario	Extensión de la tierra	Secado por calor	Incineración	Tamaño de la planta	Ventajas ¹	Desventajas ¹
Lagunas	Sí	Sí	No	No	Pequeño	Poco consumo de energía. No consume sustancias químicas. La materia orgánica se estabiliza aún más. Es insensible a la variabilidad del lodo. El costo de capital es bajo cuando hay tierra disponible. Es el que requiere la menor cantidad de destreza para su operación.	Problemas potenciales de malos olores y vectores. Potencial de contaminación del agua subterránea. Utiliza más superficie terrestre que los métodos mecánicos. Su apariencia puede ser desagradable. Las lluvias desaceleran la deshidratación; funciona mejor en climas calientes y secos.
Prensa de filtro	Sí	Variable	Generalmente no	Sí		La mayor concentración de sólidos en la torta de lodo. Bajo contenido de sólidos en suspensión en el filtrado.	Operación en lotes. El costo del equipo es alto. El costo de la mano de obra es alto. Requiere una estructura especial de soporte. Se requiere una superficie grande para el equipo. Se requiere personal de mantenimiento capacitado. Tienen que eliminarse los sólidos adicionales resultantes del proceso grande de adición de químicos.
Filtros de cinturón horizontal	Sí	Sí	Sí	Sí		Poca necesidad de energía. Los costos de capital y de explotación son relativamente bajos. Es menos complejo desde el punto de vista mecánico y más fácil de mantener. La presión alta es más fácil de mantener mecánicamente. Las máquinas de alta presión son capaces de producir una torta muy seca. Se requiere un esfuerzo mínimo para cerrar el sistema.	Tiene limitaciones hidráulicas en su operación. Requiere un triturador de lodo en la corriente alimentadora. Es muy sensible a las características de la corriente alimentadora de lodo. La vida del medio de filtración es corta en comparación con otros dispositivos que utilizan medios de tela. En general, no se aconseja su operación automática.
Filtro al vacío rotatorio	Sí	Sí	Sí	Sí		No se requiere personal capacitado. Las necesidades de mantenimiento son pequeñas para el equipo que opera continuamente.	Consumo de energía más alto por unidad de lodo deshidratada. Requiere atención continua por el operador. Las bombas al vacío son ruidosas. El filtrado puede contener un alto nivel de sólidos en suspensión según el medio de filtración.

Modificado del Standard Handbook of Environmental Engineering, R. Corbitt

¹Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse, Metcalf y Eddy

Cuadro 20. Características de la deshidratación del lodo

	Necesidad de terreno	Manejo de la variación del caudal	Manejo de la variación en la calidad del influente	Confiabilidad	Facilidad de operación y mantenimiento
Centrífuga	Más pequeña	Promedio	Promedio	Buena	Buena
Filtración	Mediana	Promedio	Promedio	Buena	Buena
Lecho de secado	Más grande	Bueno	Bueno	Promedio	Muy buena

Modificado de Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operations, S.R. Qasim

Cuadro 20.1. Remoción de los residuos del lodo

	Necesidad de terreno	Manejo de la variación del flujo	Manejo de la variación en la calidad del influente	Confiabilidad	Facilidad de operación y mantenimiento	Temas afines
Relleno sanitario	Más grande ²	Bueno ²	Bueno ²	Muy buena ²	Buena ²	Deben controlarse los lixiviados/escurrimientos; se establecen reglamentos ¹
Aplicación a la tierra	Más grande ²	Bueno ²	Bueno ²	Promedio ²	Buena ²	Costo bajo; se establecen reglamentos; se reglamenta el consumo de cultivos; deben controlarse los escurrimientos ¹
Fijación química						Costo alto para los lodos que contiene desechos peligrosos ¹
Inyección en pozo profundo						Preocupación por la contaminación del agua subterránea ¹
Incineración	Pequeña ²	Promedio ²	Bueno ²	Muy buena ²	Promedio ²	Relleno sanitario de cenizas ²

Fuente: ¹Standard Handbook of Environmental Engineering, R. Corbitt

²Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation, S.R. Qasim.

Estudio de caso: Utilización de biosólidos como nutrientes para las tierras agrícolas

La Autoridad de Alcantarillado de Landis, en el sur del estado New Jersey, decidió mejorar su instalación de tratamiento de aguas servidas para alcanzar una capacidad de 8,2 mgd. A fin de atender las metas de conservación establecidas, la Autoridad compró 380 acres de tierras boscosas cerca de la instalación. Parte de dichas tierras se utilizará para cultivar heno y maíz mediante el uso de biosólidos estabilizados como única fuente de nutrientes. Entre los beneficios se encuentran los ingresos creados por la venta de heno y maíz, así como el control de los costos de transporte y eliminación de los biosólidos. Esta aplicación se limita a los meses de más calor ya que los reglamentos prohíben que se apliquen en suelos congelados o cubiertos por nieve.

Fuente: Palmer, D.W., y Shimp, C.G., New Jersey Wastewater Authority Buys Farmland for Biosolids Disposal, *Water Engineering & Management*, julio de 1995, p.37.

3.7 Tratamiento de aguas negras en tierra

Si existe suficiente terreno, y el caudal de las aguas negras oscila entre ciertos límites específicos, los sistemas de tratamiento en tierra pueden constituir una alternativa factible para el tratamiento de aguas negras. Los sistemas utilizan las plantas, la superficie terrestre y la matriz del suelo para tratar las aguas servidas. Este tratamiento comprende una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. Casi todos los sistemas de tratamiento en tierra requieren que las aguas negras pasen por lo menos por una etapa de sedimentación primaria antes de ser tratadas. En el Cuadro 22 se presentan las características y requerimientos de estos sistemas.

Cuadro 22. Sistemas de tratamiento en tierra

	Régimen lento	Flujo sobre la tierra	Infiltración rápida	Aplicación en tierras húmedas	Plantas acuáticas flotantes
Metas del tratamiento	Tratamiento secundario o avanzado de las aguas negras	Remoción secundaria de nitrógeno	Tratamiento secundario o avanzado de las aguas negras	Tratamiento secundario de las aguas negras	
Vegetación	Varios cultivos	Gramíneas tolerantes al agua	No	Se requiere ¹	Se requiere ¹
Restricciones climáticas	Con frecuencia se necesita almacenamiento en temperaturas frías	Con frecuencia se necesita almacenamiento en temperaturas frías	Si se diseña adecuadamente no se requiere almacenamiento	Con frecuencia se requiere almacenamiento en temperaturas frías ¹	Con frecuencia se requiere almacenamiento en temperaturas frías ¹
Carga hidráulica	0,5-6 m/año	3-20 m/año	6-100 m/año	6-20 m/año ¹	6-20 m/año ¹
Superficie requerida	0,0603-0,5920 km ² /(millón de l/d) ¹	0,0065-0,0484 km ² /(millón de l/d) ¹	0,0040-0,0603 km ² /(millón de l/d) ¹	0,0194-0,0667 km ² /(millón de l/d) ¹	0,0194-0,0667 km ² /(millón de l/d) ¹
Diretrizes de diseño	Puede utilizarse para tratamiento primario si la ubicación es aislada, se restringe el acceso del público y no hay cultivos para el consumo humano. El nivel de material fecal de menos de 1.000 MPN/100ml es aceptable salvo para los cultivos que se comen crudos. La materia fecal debe ser de menos de 200 para las zonas de acceso público.	El cribado o trituración son aceptables si la ubicación es aislada y si se restringe el acceso del público. Se requiere aireación (control de malos olores) si es un entorno urbano.	Puede utilizarse para el tratamiento primario si la ubicación es aislada y si se restringe el acceso del público.		
Requisitos de la profundidad del suelo	>0,6 m	>0,3 m	>1,5 m		
Permeabilidad del suelo	Lenta a moderadamente rápida: 1,5-500 mm/h	Muy lenta a moderadamente lenta: <5,0 mm/h	Rápida: >50 mm/h	De lenta a moderada ¹	De lenta a moderada ¹
Profundidad del agua subterránea	0,6-1 m	No es decisiva	1 m	No es decisiva ¹	No es decisiva ¹
Pendiente %	<20% si es cultivada <40% si no es cultivada	0-15%	<10%	<5% ¹	<5% ¹
Carga máxima (BOD)	500 kg/ha*d	100 kg/ha*d	670 kg/ha*d		
Calidad promedio del efluente	<2 mg/l de BOD <1 mg/l de S.S. 3 mg/l de N total <0,1 mg/l de P ¹ total	10 mg/l de BOD 15 mg/l de S.S. 5 mg/l de N total 4 mg/l de P ¹ total	2 mg/l de BOD 2 mg/l de S.S. 10 mg/l de N total 1 mg/l de P ¹ total		

Modificado de “Design of Municipal Wastewater Treatment Plants”, volumen II, WEF/ASCE

¹ Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, and Reuse, Metcalf y Eddy

² Wastewater Treatment Plants, Planning, Design, and Operation, S.R. Qasim

3.8 Análisis de costo

Aunque los costos de compra del equipo, construcción y operación dependen de una serie de factores, pueden calcularse algunas cifras promedio de costo. En el Cuadro 23 aparecen algunas. Estos valores son sólo para fines de comparación ya que la fase de diseño produce con mayor precisión la información requerida sobre el cálculo de costos. Asimismo, debe recurrirse a otra fuente de información más apropiada, como por ejemplo, el índice de costos de la EPA (Organismo de Protección Ambiental de los EE.UU.) sobre la construcción de plantas de tratamiento y alcantarillado, a fin de calcular los efectos de la inflación a partir de la fecha en que se elaboró originalmente el cuadro. De igual modo, deben tomarse en cuenta las diferencias en los costos y tipos de cambio en los diferentes países.

Cuadro 23. Costo de procesos específicos de tratamiento de aguas negras

	Costo de construcción Millones de US\$	Operación y mantenimiento Millones de US\$/año
Tratamiento preliminar	0,2-0,3	0,03-0,04
Clarificador primario	0,5	0,045
Lodo activado convencional	1,8	0,1
Clarificador final	0,8	0,065
Filtro percolador de alta velocidad	1,0	0,035
Clarificador para el filtro percolador de alta velocidad	0,9	0,085
Cloración	0,3	0,065
Espesador por gravedad	0,1	0,006
Digestor aeróbico	0,6	0,068
Digestores anaeróbicos en dos etapas	0,6	0,035
Lechos de secado del lodo	0,4	0,068
Prensa de filtro	0,7	0,063
Relleno sanitario	0,075	0,04

El índice de los costos es al mes de septiembre de 1976; por lo tanto debe recurrirse a índices de costos apropiados, tales como el índice de la EPA denominado Treatment Plant and Sewer Construction Cost Index, y el de la Water Environment Federation. Las cifras que aparecen más arriba se derivan de las curvas de costo que aparecen en Wastewater Treatment Plants, Planning, Design, and Operations, S.R. Qasim. Los costos son para un caudal especificado de 10 millones de galones por día.

4.0 RESUMEN

Hemos presentado una descripción de las etapas y tecnologías principales de tratamiento de las aguas negras municipales. Se comparan las tecnologías con respecto a características tales como su rendimiento, explotación y costo. Asimismo, se presenta una serie de cuadros, matrices y comparaciones de texto.

El documento podría ser de utilidad para funcionarios municipales así como para otras autoridades públicas y del sector privado que deseen examinar las opciones que existen para el tratamiento de aguas negras municipales. Dichos funcionarios pueden analizar estas tecnologías a fin de determinar cuáles merecen una mayor consideración.

APÉNDICE A REFERENCIAS

- Albertson, Orris E., Nutrient Control, Manual of Practice No. FD-7, Water Pollution Control Federation (now Water Environment Federation), Alexandria, VA, 1983.
- Bailey, James E. and David F. Ollis, Biochemical Engineering Fundamentals, Chapter 14, 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 1986.
- Cheremisinoff, Paul N., Sludge: Management and Disposal, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1994.
- Corbitt, Robert, Standard Handbook of Environmental Engineering, Chapter 6 "Wastewater Disposal," McGraw-Hill, Inc., New York, 1989.
- Cuthbert, Lyle G., "Full Scale Deep Shaft Plants - Municipal", Deep Shaft Technology, Inc., 1996.
- Daigger, Glen, "Biological Nutrient Removal," Municipal Wastewater Treatment Technology, Recent Developments, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, 1993.
- Eckenfelder, W. Wesley, and Jack L. Musterman, Activated Sludge Treatment of Industrial Wastewater, Technomic Publishing Company, Lancaster, PA, 1995.
- Eckenfelder, W. Wesley, Industrial Water Pollution Control, 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 1989.
- Gerheart, R.A., "Use of Constructed Wetlands to Treat Domestic Wastewater, City of Arcata, California," Municipal Wastewater Treatment Technology, Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ, 1993
- Great Lakes-Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers, "Recommended Standards for Sewage Works", Health Research Inc., Albany, NY, 1978
- Grogan, Timothy J., "Costs, Material Prices/Market Trends," Engineering News Record, McGraw-Hill, New York, May 6, 1996, pg. 152.
- Hammer, Mark J., Water and Wastewater Technology, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986.
- Handa, B. K., V. S. Kulkarni, and P. Khanna, "Ranking of Technology Options for Municipal Wastewater Treatment", Asian Environment, vol. 12 (3), pp. 28-40, 1990.
- Harrison, John R., O&M of Fixed Film Reactors, Manual of Practice OM-10, Water Pollution Control Federation (now Water Environment Federation), Alexandria, VA, 1988.

Hertert, D., personal communication, September 24, 1996

Hicks, Tyler G., Standard Handbook of Engineering Calculations, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., New York, 1985.

Huang, Wen H., Dr., Construction Costs for Wastewater Treatment Plants: 1973-1982, U.S. EPA reference number: EPA/430/9-83-004, Washington D.C., June 1983.

Jones, Myron, "Energy Efficient Aeration Systems for Wastewater Treatment," EPRI Industrial Program, Palo Alto, CA, 1993.

Masters, Gilbert M., Introduction to Environmental Engineering and Science, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1991.

Mays, Larry W., Water Resources Handbook, McGraw-Hill, Inc., New York, 1996.

Noyes, Robert (Ed.), Unit Operations in Environmental Engineering, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1994.

Outwater, Alice B., Reuse of Sludge and Minor Wastewater Residuals, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 1994.

Palmer D.W., Shimp C. G., "New Jersey Wastewater Authority Buys Farmland for Biosolids Disposal", Water Engineering & Management, p.37, July 1995

Peters, Max Stone, and K. D. Timmerhaus, Plant Design and Economics for Chemical Engineers, p. 163 and Appendix B, 4th Ed., McGraw-Hill, Inc., New York, 1991.

Pontius, Frederick W. (Ed.), Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies, 4th Ed., McGraw-Hill and American Water Works Association, New York, 1990.

"Proceedings of the U.S. Environmental Protection Agency Municipal Wastewater Treatment Technology Forum" 20-22 March, 1990, in Orlando FL, U.S. EPA, September, 1990.

Qasim, Syed R., Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation, Technomic Publishing Company, Inc., 1994.

Randall, Clifford W., James L. Barnard, H. David Stensel, Water Quality Management Library - Volume 5: Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal, Technomic Publishing Company, Lancaster, PA, 1992.

Rittman, Professor, CE 442 Class Notes and Readings, University of Illinois, Spring 1992.

Science Applications International Corporation, "Summary Report, Small Community Water and Wastewater Treatment," Prepared for U.S. EPA, EPA/625/R-92/010, 1992.

Tchobanoglous, George, and Franklin L. Burton, Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse / Metcalf & Eddy, Inc., 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, 1991.

U.S. Environmental Protection Agency, Construction Costs for Municipal Wastewater Treatment Plants: 1973-1982, EPA/430/9-83-004, June 1983

U.S. Environmental Protection Agency, Design Manual, Municipal Wastewater Disinfection, EPA/625/1-86/021, October 1986

U.S. Environmental Protection Agency, Manual: Nitrogen Control, EPA/625/R-93/010, September 1993.

U.S. Environmental Protection Agency, Manual: Wastewater Treatment/Disposal for Small Communities, EPA/625/R-92/005, September, 1992.

U.S. Environmental Protection Agency, "Municipal Wastewater Treatment Technology: Recent Developments," Noyes Data Corporation, Ridge Park, NJ, 1993.

U.S. Environmental Protection Agency, "POTW Expert, Version 1.1, An Advisory System for Improving the Performance of Wastewater Treatment Facilities," EPA/625/11-90/001, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, 1991.

Water Engineering & Management, "Installing Advanced Disinfection Hardware Achieves Plant Upgrade", p.24, March 1995.

Water Environment Federation, Pretreatment of Industrial Wastes, Manual of Practice No. FD-3, Alexandria, VA, 1994.

Water Environment Federation and the American Society of Civil Engineers, Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, Vol. 1 & 2, Alexandria, VA, 1991.

White, Martin (Ed.), "2nd International Conference on Advances in Water and Effluent Treatment," 8-10 December, 1993 in Cumbria, UK, Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1993.

APÉNDICE B ASOCIACIONES Y ORGANIZACIONES

American Consulting Engineers Council
Howard M. Messner, Executive Vice President
Suite 802
1015 15th Street, NW
Washington, DC 20005
tel. 202-347-7474
fax 202-898-0068

El ACEC es una asociación de empresas consultoras estadounidenses de ingeniería, que incluye a aquellas que trabajan en el diseño, construcción, operación y gestión de la infraestructura de abastecimiento de agua y de tratamiento de aguas negras. El ACEC publica una lista de miembros así como el *International Engineering Directory*, recursos sumamente útiles para la identificación de las empresas consultoras de ingeniería de los EE.UU.

American Society of Civil Engineers
James E. Davis, Executive Director
Suite 600
1015 15th Street, NW
Washington, DC 20005
tel 202-789-2200

ASCE es la sociedad profesional de ingenieros civiles de los EE.UU. Esta sociedad patrocina actividades técnicas y profesionales en el ámbito de la ingeniería de recursos hídricos y de aguas negras.

American Water Works Association
John B. Mannion, Executive Director
6666 West Quincy Avenue
Denver, CO 80235
tel. 303-794-7711
fax 303-795-1440
Dirección en la Web: <http://www.awwa.org/>

La AWWA es una asociación de servicios públicos de recursos hídricos de los EE.UU. y Canadá que respalda actividades de investigación, formulación de normas y servicios de información sobre el diseño, construcción, operación y mantenimiento de sistemas de abastecimiento de agua.

Environmental Business Council of New England
Merna Hurd, President
150 Federal Street, 23rd Floor
Boston, MA 02110-1726
tel. 617-737-0060
fax 617-951-8736

El EBC de Nueva Inglaterra es una asociación de proveedores de bienes y servicios ambientales.

Environmental Export Council
John Mizroch, Executive Director
P.O. Box 77287
Washington, DC 20013
tel. 202-466-6933
fax 202-789-1623

El EEC es una asociación de proveedores de equipos y servicios ambientales de los EE.UU. El consejo trabaja estrechamente con la industria, gobierno y otras entidades para promover el comercio internacional y el intercambio de tecnologías ambientales. El EEC y su Grupo de Trabajo sobre Recursos Hídricos en América Latina (Latin America Water Task Force) trabaja estrechamente con las autoridades brasileñas y con la Agencia Internacional para el Desarrollo (AID) de los EE.UU. para promover la participación del sector privado estadounidense en la infraestructura hídrica y de aguas negras del Brasil.

International Water Conference
Engineers' Society of Western Pennsylvania
The Pittsburgh Engineers' Building
337 Fourth Avenue
Pittsburgh, PA 15222
tel. 412-261-0710

El International Water Conference es una conferencia técnica sobre el tratamiento de recursos hídricos. Se orienta hacia los expertos–usuarios finales, en los ámbitos de la tecnología industrial, de servicios públicos y de aguas servidas. La 57^a Conferencia Internacional Anual sobre Recursos Hídricos se celebró en el mes de octubre de 1996 en Pittsburgh, Pensilvania.

NACE International (formerly the National Association of Corrosion Engineers)
G.M. Shenkel, Director
P.O. Box 218340
Houston, TX 77218
tel. 713-492-0535
fax 713-492-8254

NACE es la asociación profesional de ingenieros de corrosión. La corrosión constituye un problema en las infraestructuras de agua y de aguas servidas.

Purdue Waste Conference
Attn.: Dr. Jim E. Alleman
Purdue University
School of Civil Engineering
West Lafayette, IN 47907-1284
tel. 317-494-7705
fax 317-496-1107

El Purdue Waste Conference es una conferencia técnica importante sobre el tratamiento de desechos industriales y peligrosos, incluidas las aguas negras industriales. La 51^a Conferencia Anual de Agua Industrial se celebró en el mes de mayo de 1996.

U.S. Environmental Protection Agency
401 M Street, SW
Washington, DC 20460
Office of Water: tel. 202-260-5700
Office of International Activities: tel. 202-260-4870
EPA's water page Dirección en la Web: <http://www.epa.gov/OWOW/>

La EPA (U.S. Environmental Protection Agency), el Organismo de Protección Ambiental de los Estados Unidos, es responsable de la mayoría de los reglamentos ambientales de alcance federal. Este organismo también respalda actividades de investigación, desarrollo, asistencia técnica y difusión de información. La Oficina de Recursos Hídricos de la EPA tiene jurisdicción sobre la calidad del agua, incluida el agua potable y las descargas de efluentes. La Oficina de Actividades Internacionales es responsable de la cooperación ambiental internacional y de la asistencia técnica.

Water and Wastewater Equipment Manufacturers Association
Dawn C. Kristof, President
P.O. Box 17402
Dulles International Airport
Washington, DC 20041
tel. 703-444-1777
fax 703-444-1779

La WWEMA es una asociación de fabricantes de equipo para obras hidráulicas, el tratamiento de aguas negras y el control de desechos industriales. El directorio de miembros y la guía de productos (*Membership Directory and Product Guide*) de la asociación es un recurso muy útil para la identificación de proveedores estadounidenses de equipo para el tratamiento del agua y de las aguas servidas. La WWEMA trabaja activamente en la promoción del comercio internacional de bienes y servicios ambientales.

Water Environment Federation
Dr. Quincalee Brown, Executive Director
601 Wythe Street
Alexandria, VA 22314-1994
tel. 703-684-2400
fax 703-684-2492
Dirección en la Web: <http://www.wef.org>

La WEF es una sociedad técnica de científicos, ingenieros, funcionarios municipales, operadores de plantas, fabricantes de equipo, estudiantes y otras personas interesadas en temas relativos a la calidad de los recursos hídricos. La WEF respalda actividades de investigación y educación; ofrece cursos de capacitación, publicaciones y videos, y celebra conferencias sobre temas relacionados con la calidad del agua, incluidos el diseño, operaciones y mantenimiento de instalaciones de agua y de aguas negras.

APÉNDICE C GUÍAS PARA LOS COMPRADORES E ÍNDICES DE ABASTACEDORES

Una serie de revistas de la industria, revistas profesionales y asociaciones publican guías anuales para compradores así como índices de abastecedores para la identificación de los productos, vendedores y proveedores de servicios relacionados con los recursos hídricos y las aguas servidas. El Thomas Register es una extensa guía de empresas estadounidenses en el sector de la manufactura (no sólo con relación al agua y las aguas negras).

“Buyer’s Guide & Yearbook,” Water Environment Federation, 601 Wythe Street, Alexandria, VA 22314. Teléfono 703-684-2400. Dirección en la Web: <http://www.wef.org>

“Chemical Engineering”, McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, NY 10020. Teléfono: 212-512-2000 (ISSN 0009-2460). Dirección en la Web: <http://www.che.com>

“Environmental Solutions”, Advanstar Communications, Inc., 201 E. Sandpointe Ave., Suite 600, Santa Ana, CA 92707. Teléfono: 714-513-8400 (ISSN 0898-5685).

“Environmental Engineers Selection Guide,” American Academy of Environmental Engineers, 130 Holiday Court, No. 100, Annapolis, MD 21401. Teléfono 410-266-3311.

“Environmental Science & Technology”, The American Chemical Society, 1155 16th Street, N.W., Washington, DC 20036. Teléfono: 202-872-6316 (ISSN 0013-936X).

“International Engineering Directory” and “Membership Directory,” American Consulting Engineers Council, Suite 802, 1015 15th Street, NW, Washington, DC 20005. Teléfono 202-347-0068.

“Membership Directory and Product Guide,” Water and Wastewater Equipment Manufacturers Association, P.O. Box 17402, Dulles International Airport, Washington, DC 20041. Teléfono 202-444-1777.

“Pollution Engineering”, Cahners Publishing Company, 8773 S. Ridgeline Blvd., Highlands Ranch, CO 80126. Teléfono: 303-470-4445 (ISSN 0032-3640).

“Pollution Equipment News”, Rimbach Publishing Inc., 8650 Babcock Boulevard, Pittsburgh, PA 15237. Teléfono: 412-364-5366.

“Power”, McGraw-Hill Companies, Inc., 11 West 19th Street, New York, NY 10011. Teléfono: 609-426-5667 (ISSN 0032-5929).

Thomas Register, Thomas Publishing Company, Five Penn Plaza, New York, NY 10001.
Teléfono: 212-695-0500. Dirección en la Web: <http://www.thomasregister.com>
“Water & Wastes Digest”, Scranton Gillette Communications, Inc., 380 E. Northwest
Highway, Des Plaines, IL 60016. Teléfono: 847-298-6622 (ISSN 0043-1141). Dirección
en la Web: <http://WWDigest.com>

“WaterWorld”, PennWell Publishing Company, 1421 S. Sheridan Road, Tulsa, OK 74112.
Teléfono: 918-831-9862 (ISSN 1068-5839). Dirección en la Web:
<http://www.waterworld.com>

APÉNDICE D DIRECCIONES EN INTERNET

Organización	Contenido	Site
American Water Works Assn	Asociación de abastecimiento de agua	http://www.awwa.org/
Chemical Engineering Magazine	Publicación de revistas	http://www.che.com
Chemical Marketing Reporter	Comercio químico, precios actuales	http://www.chemexpo.com
Electric Power Research Institute	Electrotecnologías para aguas servidas	http://www.epri.com/96plan/csg/iats/iats2.html
Environment & Municipal Online	Información y vínculos en la industria ambiental	http://www.environmentonline.com
EPA	Página hídrica de la EPA	http://www.epa.gov/OWOW/
EPA Office of Water	Intercambio sobre fuentes de la información	http://pipes.ehsg.saic.com/pipes.htm
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	Estadísticas sobre el Brasil	http://www.ibge.gov.br/english/e-home.htm
PennWall Publishing	Publicación de revistas	http://www.penwall.com
Pollution Online	Información y vínculos en la industria ambiental	http://www.pollutiononline.com
Public Works Online	Información y vínculos sobre obras públicas	http://www.publicworks.com
Remco	Compañía de tratamiento de agua	http://remco.com/~remcobob/home.htm
Thomas Register	Listas de vendedores y abastecedores	http://www.thomasregister.com
University of California at LA	Pretratamiento de aguas negras industriales	http://cct.seas.ucla.edu/cct.ww.html
University of Cracow	Vínculos de tecnología de recursos hídricos	http://www.uci.agh.edu.pl/polconn/water.htm
Utility Plant Directory	Estudios de casos	http://www.caeconsultants.com/plant.htm#wastewater
Virtual Library	Ingeniería de aguas negras	http://www.halcyon.com/cleanh2o/ww/commerce.html
Virtual Library	Estudio de plantas de tratamiento de agua	http://www.halcyon.com/cleanh2o/ww/muniwater.html
Virtual Library	Lista de libros de referencia	http://www.halcyon.com/cleanh2o/ww/book1.html
Virtual Library	Enfoques hacia el tratamiento de agua	http://www.halcyon.com/cleanh2o/ww/wwt1.html
Water & Wastes Digest	Abastecedores de equipo	http://WWDigest.com
Water Engineering & Management	Publicaciones sobre recursos hídricos	http://WaterEM.com
Water Engineering Management	Publicaciones sobre recursos hídricos	http://waterem.com/waterem.html
Water Environment Federation	Asociación profesional sobre recursos hídricos y aguas negras	http://www.wef.org
Water Online	Vínculos del mundo de los recursos hídricos	http://www.wateronline.com
Water Web	Información sobre tecnologías hídricas	http://www.waterweb.com
Water World Magazine	Datos técnicos hídricos	http://www.waterworld.com

APÉNDICE E ÍNDICE DE CARACTERÍSTICAS Y EXPLICACIONES

Categoría	Característica	Explicación de la característica
Caudal:	Tiempo de detención (min):	Una medida del tiempo en que permanece la corriente de aguas negras en la tecnología de tratamiento específica.
	Manejo de la variabilidad:	Una descripción relativa sobre la eficiencia de la tecnología bajo condiciones de flujo variables. “Muy eficaz” implica que la tecnología es muy eficiente y puede manejar regímenes de caudal variables. “Eficacia promedio” y “menos eficaz” son los otros términos que describen esta característica.
	Velocidad de aproximación (m/s):	Una medida de la velocidad a la cual la corriente de aguas negras se acerca a la tecnología de tratamiento específica.
	Tasa de rebase (m ³ /día/m ²):	Una medida del volumen y de la velocidad a la que la corriente de aguas negras se retira de la tecnología de tratamiento específica.
Composición del influente	Ancho del tamiz (mm):	Una medida de la distancia que existe entre los elementos utilizados en las tecnologías de cribado.
	Longitud de corte (mm):	Una medida de la longitud de los sólidos de la corriente de aguas negras que han sido cortados por pulverizadores o trituradores.
	Velocidad de carga de los SS (kg/m ² /h):	Una medida del ritmo al cual los sólidos en suspensión se acercan al proceso de sedimentación/clarificación.
Tratamiento	Tasa de remoción del BOD (% promedio):	El porcentaje promedio de la Demanda Biológica de Oxígeno (BOD) que se remueve de la corriente de aguas negras.
	Tasa de remoción de los TSS (% promedio):	El porcentaje promedio de Sólidos en Suspensión Totales (TSS) removidos de la corriente de aguas negras a través de una tecnología específica.
	Productos derivados:	Materiales generados a través del uso/aplicación de una tecnología, que requieren manipulación o atención adicional. Entre estos materiales se encuentran los productos del cribado, el lodo y los desechos sólidos.
Equipo	Facilidad de operación:	Una descripción relativa de la facilidad con la cual se utiliza una tecnología específica. Entre los factores que se consideran para clasificar un proceso como fácil, mediano o difícil están: la cantidad de capacitación y educación requerida, el número de operadores que se requiere y la medida de dificultad en el funcionamiento o mantenimiento de una tecnología específica.
	Necesidad de espacio:	Una descripción relativa del espacio que requiere un equipo: grande, mediana o pequeña.
	Confiabilidad:	Una descripción relativa de la confiabilidad de la tecnología: grande, mediana o pequeña. Un factor que se considera en la clasificación es el número relativo de piezas móviles.
	Robustez:	Una descripción relativa de la robustez de la tecnología: grande, mediana o pequeña. Los factores que se consideran en la clasificación incluyen la capacidad de resistirse a situaciones inusitadas (por ejemplo, un régimen de caudal grande, grandes concentraciones, etc.), la facilidad con la que puede cerrarse y volverse a iniciar el proceso, y su capacidad de aceptar condiciones cambiantes en la operación
Costo estimado	Capital:	Un cálculo estimativo del capital inicial que se requiere para construir/instalar la tecnología. Los datos se presentan en dólares estadounidenses (miles de US\$), o en términos relativos: más costosa, costo mediano o menos costosa.
	Operación y mantenimiento/año:	El costo anual aproximado en el que se incurre para el funcionamiento y mantenimiento (mano de obra y materiales) de una tecnología específica. Los datos se presentan en dólares estadounidenses (miles de US\$), o términos relativos: más costoso, costo mediano o menos costoso.
	Energía/año:	El costo anual aproximado en el que se incurre para suministrar energía destinada a una tecnología específica. Los datos se presentan en dólares estadounidenses (miles de US\$), o en términos relativos: más costosa, costo mediano o menos costosa.